

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Merenkulku /Merenkulun insinööri

Asko Hänninen

LAIVADIESELEIDEN SÄHKÖOHJATUT RUISKUTUSJÄRJESTELMÄT

Opinnäytetyö 2014

TIIVISTELMÄ

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Merenkulku

HÄNNINEN, ASKO

Insinööri

Työn ohjaaja

Toimeksiantaja

Maaliskuu 2014

Avainsanat

Laivadieseleiden sähköohjatut ruiskutusjärjestelmät

42 sivua + 1 liitesivu

Lehtori Ari Helle

Merenkulun ja logistiikan painoala; KYAMK

ruiskutus, yhteispaineruiskutus, HEUI, pumppusuutin

Opinnäytetyön tarkoituksena on tutustuttaa lukija erilaisiin laivoissa esiintyviin sähköisesti ohjattuihin ruiskutusjärjestelmiin. Yleistyvät, nykyaikaiset yhteispaineruiskutusmoottorit ja muut sähköiset järjestelmät poikkeavat melko paljonkin perinteisistä laivadieseleiden ruiskutusjärjestelmistä. Työssä esitellään ruiskutusjärjestelmien tekniikka ja yleisimpien eri valmistajien järjestelmät. Perehdytään myös sähköisten ruiskutusjärjestelmien etuihin ja niiden kykyyn vaikuttaa muun muassa päästöihin.

Tieto on pääosin kerätty laivadieselmootoreiden sekä ruiskutustekniikan alan kirjallisuutta käyttäen. Eri valmistajien moottoreiden ruiskutusjärjestelmien esittelyssä on hyödynnetty myös valmistajien esitteitä verkosta.

Vaikka jonkinlainen jo pitkään käytössä ollut mekaaninen vastine monille tässä työssä esitellyistä järjestelmistä löytyykin, ovat yhteispaineruiskutus, sähköohjattu pumppusuutin ja ruiskutuspumppu sekä sähköhydraulinen ruiskutusjärjestelmä kaikki suhteellisen tuoretta tekniikkaa ja vasta tulossa laivoille. Niiden joustavalla ruiskutuksen säädöllä saavutetaan monia etuja verrattuna perinteisiin ruiskutusjärjestelmiin, kuten alentuneet päästöt ja kulutus, kasvaneet tehot ja käyttöominaisuudet.

ABSTRACT

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

University of Applied Sciences

Marine Technology

HÄNNINEN, ASKO

Bachelor's Thesis

Supervisor

Commissioned by

March 2014

Keywords

Electronic Marine Diesel Injection Systems

42 pages + 1 page of appendice

Ari Helle, Senior Lecturer

Merenkulun ja logistiikan painoala; KYAMK

injection, common rail, HEUI, unit injector

The object of the thesis was the introduction of electronic marine diesel injection systems. In recent years, the electronically controlled diesel injection systems have been increasing in numbers. They are still a rather unknown form of fuel injection in larger marine diesel engines.

This study was conducted because the modern injection systems are radically different from the traditional pump- line- nozzle systems and in the near future most engineers are going to be involved with them.

Most of the information in this thesis was collected from diesel injection systems and marine diesel engine books. The engine specific chapters are mainly based on engine manufacturers' brochures.

During the study, it was found out that there are many challenging aspects with the injection systems of the large diesel engines yet to overcome. Still as a conclusion, the advanced diesel fuel injection equipment has many useful features over the traditional mechanical injection systems such as flexibility, lower fuel consumption and better emissions. Especially, the market share of common rail injection will grow vastly as a consequence of rising fuel prices and tightening emission norms.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

KÄSITTEET	6
1 JOHDANTO	7
2 HISTORIA	8
2.1 Varhaiset vaiheet	8
2.2 Sähköohjatun ruiskutusjärjestelmän synty	9
2.3 HEUI-järjestelmät	10
3 COMMON RAILIN TOIMINTAPERIAATE JA KOMPONENTIT	11
3.1 Polttoaineen kierto	11
3.2 Ruiskutuspumppu	12
3.3 Polttoaineventtiilit	13
3.4 Polttoainekisko, paineakku	14
3.5 Virtauksensäätö	15
3.6 Servohydrauliikka	16
3.7 Anturit	17
3.8 Moottorinohjaus	18
4 EDUT MEKAANISEEN RUIKUTUKSEEN VERRATTUNA	19
4.1 Tekniikka	19
4.2 Päästöt ja kulutus	21
5 HEUI-RUIKUTUKSEN TOIMINTAPERIAATE	23
6 EUI- JA EUP- RUIKUTUKSEN TOIMINTAPERIAATE	26
7 NELITAHTI LAIVADIESELIT	28
7.1 Wärtsilän Common Rail -nelitahtimoottorit	28
7.2 MAN B&W nelitahtiset dieselmoottorit	30
7.3 MTU (Detroit Diesel).	33
7.4 Caterpillar	35

8	KAKSITAHTIDIESEL	36
8.1	MAN B&W	36
8.2	Sulzer	37
9	PÄÄTELMÄT	38
	LÄHTEET	40
	LIITE	43

KÄSITTEET

HEUI= Hydraulic-electronic unit injector, eli sähköhydraulinen pumppusuutin

EUI= Electronic unit injector, eli sähköohjattu pumppusuutin

EUP= Electronic unit pump, eli sähköohjattu ruiskutuspumppu

NO_x= Typpioksidi (päästöt)

PLN= Pump-Line-Nozzle, ruiskutuspumppu-korkeapaineputkisuutin

1 JOHDANTO

Alati tiukkenevat päästönormit ja kohoava polttoaineen hinta ajavat moottoreiden suunnittelijoita kehittämään yhä taloudellisempia ja hienostuneempia moottoreita, eivätkä laivadieselit ole tässä mikään poikkeus. Perinteinen ruiskutuspumppujärjestelmä on hankala saada käymään savuttamatta matalilla kierroksilla ja ruiskutuksen pituutta tai ajoitusta ei voida säätää käynnin aikana. Tekniikka kehittyy, ja älykkäät sähköiset järjestelmät tekevät tuloaan.

Dieselmoottorin toiminnan kannalta on erittäin tärkeää, että polttoainetta annostellaan oikea määrä oikeaan aikaan ja että se sekoittuu kokoon puristettuun ilmaan sylinterissä mahdollisimman hyvin. Mitä lähemmäksi optimia päästään, sitä parempi. Vaikka tämä kuulostaa yksinkertaiselta, on historia osoittanut kyseisen yhdistelmän muodostamisen haasteelliseksi (2, 15).

Yhteispaineruiskutusjärjestelmä, eli tunnetummin Common Rail -järjestelmä, on dieselmoottorin sähköisesti ohjattu polttoaineensyöttöjärjestelmä. Nimi viittaa yhteispaineruiskutuksenkin tavoin siihen, että syötettävän polttoaineen paine on sama kaikilla suuttimilla moottorin kierrosnopeudesta huolimatta. Eräs nimitys on myös paineakkumoottori, jota käytettiin etenkin menneinä vuosikymmeninä. Common Rail -tekniikka on ilmestynyt jo laivoihinkin, mutta se on vielä suhteellisen harvinaista ison mittakaavan dieseleissä.

Muita tässä työssä esiteltäviä ruiskutusjärjestelmiä ovat lähinnä pienemmissä dieselissä käytettävät sähköohjatut pumppusuutindieselit sekä sähköhydrauliset pumppusuutindieselit.

Opinnäytetyön tavoitteena on luoda yleiskatsaus laivojen sähköisesti ohjattuihin ruiskutusjärjestelmiin hyötyineen ja ongelmineen, historiaan, rakenteeseen ja komponentteihin. Tunnetuimpien eri valmistajien ruiskutusjärjestelmät esitellään lyhyesti erikseen niiden erojen takia.

2 HISTORIA

2.1 Varhaiset vaiheet

Common Railin historia ulottuu aina dieselmoottorin alkutaipaleille 1900-luvun alkuun jolloin vielä polttoaine ruiskutettiin sylinteriin paineilman avulla tarpeeksi hienon polttoainesumun aikaansaamiseksi. Tällainen järjestelmä vaati järeät ja paljon energiaa kuluttavat kompressorit, jotka aiheuttivat muutenkin ongelmia. Rudolf Diesel ei itsekään ollut tyytyväinen ja monen muun tavoin kehitteli tälle vaihtoehtoa. Vuonna 1913 Vickers patentoi sukellusveneissä käytettäviin Doxford- vastaiskumoottoreihin tarkoitetun mekaanisen yhteispaineruiskutusjärjestelmän, josta tuli suhteellisen suosittu, ja moottorityyppi säilyi tuotannossa aina vuoteen 1980 asti. Järjestelmän suurena etuna oli silloin, ettei se muiden aikalaistensa tapaan vaatinut paineilman käyttöä polttoaineen ruiskutuksessa. Noin 400 baarin ruiskutuspainetta tuotettiin polttoainekiskoon moottorin pyörittämällä pumpuilla ja kiskoista polttoaine syötettiin putkia pitkin polttoaineventtiileille, joita operoivat nokka- akselin käyttämät vivustot. Myöhemmin polttoaineventtiilejä käytettiin hydraulisesti. (1, XVII.)

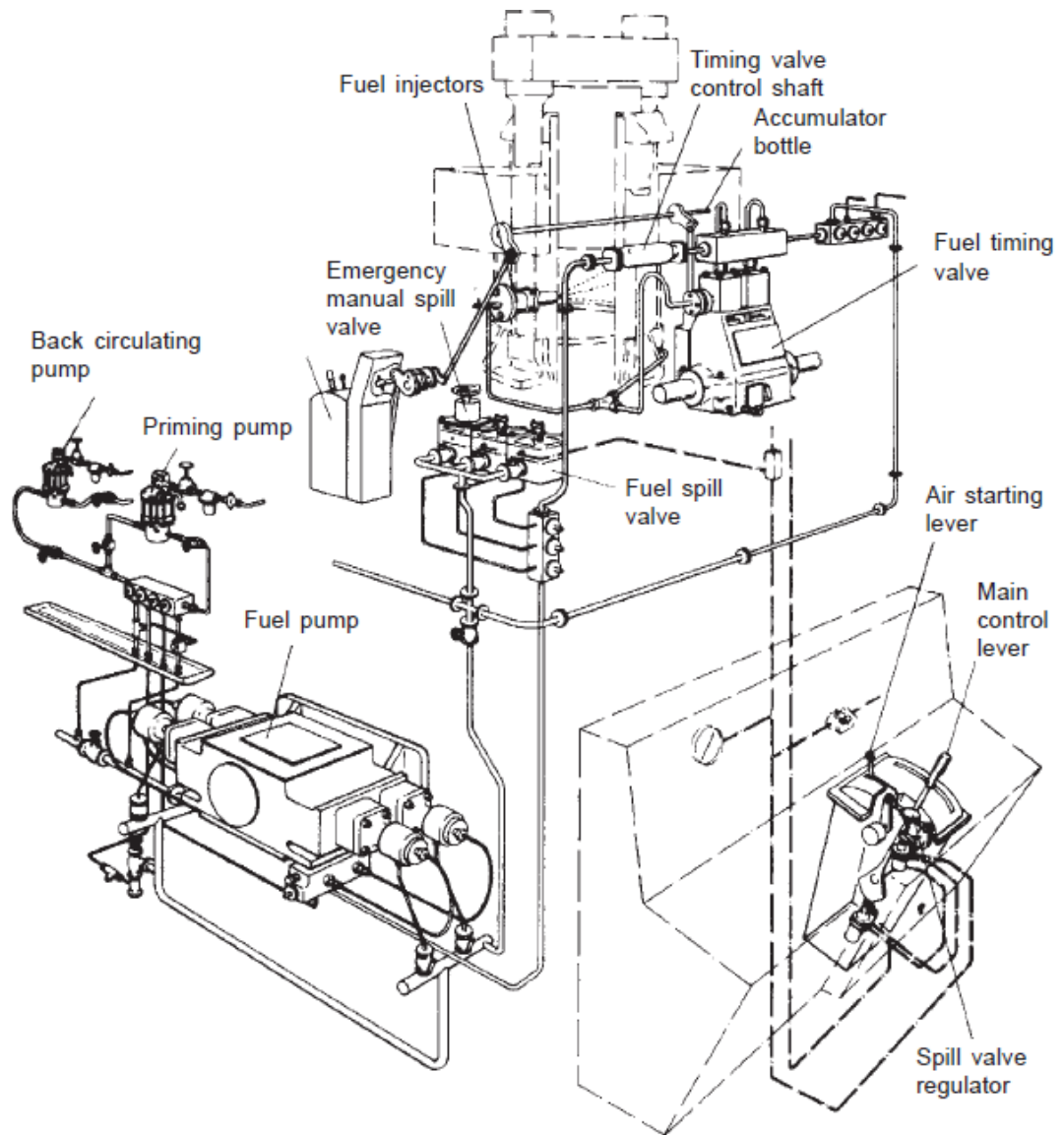


Figure 14.14 Common rail fuel system

Kuva 1. Doxford-moottorin yhteispaineruiskutusjärjestelmä. (1, 479)

Yhdysvaltalaiset Harry Kennedy ja Brooks Walker patentoivat sähköisesti ohjatun dieselmoottorin ruiskutusventtiilin 1933 ja pian sen jälkeen Atlas-Imperial toi suuttimen markkinoille. (5.)

2.2 Sähköohjatun ruiskutusjärjestelmän synty

Robert Huber rakensi Sveitsissä 1960-luvun lopussa ensimmäisen modernin Common Rail- järjestelmän prototyypin ja 1970-luvun lopulla Lucas Bryce (Nykyinen Delphi Bryce) esitteli oman sähköisen ruiskutusjärjestelmän. Siinä oli moottorin nokka- akselin käyttämä sähköisesti kontrolloitu ruiskutuspumppu ja solenoidilla ohjattu ruis-

kutussuutin sylinteriä kohden. Systeemin ilmoitettiin olevan polttoainetaloudellisempi ja vähäpäästöisempi kuin silloiset perinteiset järjestelmät ja siinä oli monia kehittyneitä ominaisuuksia, mutta lapsenkengissään olevaa tekniikkaa vieroksuttiin tuolloin eikä se ottanut tuulta alleen. Tekniikkaa kehitettiin niin Amerikassa kuin Itä- Saksassakin enemmän tai vähemmän huonoin tuloksin. Common Railin yleistyminen antoi odottaa itseään 1990-luvulle, kun Denso toi markkinoille oman jatkokehittelyn versionsa, jota käytettiin 1995 Hino Ranger -kuorma-autossa(5). Samoihin aikoihin Fiat-konserni alkoi kehitellä omaa henkilöautoihin tarkoitettua järjestelmää yhdessä Magneti Marellin kanssa.

Nopeakäyntisiä laivadieseleitä valmistava saksalainen MTU alkoi kehitellä omaa Common Railia 1990-luvun alusta lähtien. Järjestelmä tulisi käyttämään L'Orange Einspritzsystemen suunnittelemaa komponentteja. Prototyypit tuottivat lupaavia tuloksia, ja MTU esitteli vuonna 1996 nopeakäyntisessä 4000-sarjassaan ensimmäisen tämän kokoluokan common rail-moottorin.(1, 252.)

2.3 HEUI-järjestelmät

80-luvun taitteessa silloisten dieselmoottoreiden todettiin olevan tehollisilla rajoillaan. Lisää tehoa saataisiin vain moottorin kokoa kasvattamalla ja etenkin asevoimilla oli tarvetta kompakteille, tehokkaammille dieselmoottoreille. Ongelmana silloin oli noin 750 baariin rajautunut ruiskutusaine. Tavoitteena 1000 – 1200 baarin ruiskutusaine kehitettiin pumppusuutindiesel, jonka polttoaineen paine nostettiin ruiskutusaineeseen kahdessa vaiheessa. Nämä ratkaisut, kuten Lucasin Helios olivat liian kalliita kaupalliseen käyttöön, mutta osoittivat elektronisen ruiskutuksen olevan oikea tapa dieselmoottoreiden jatkokehitykseen. (2, 75.)

HEUI-järjestelmä jouduttiin kehittämään, koska haettiin korkeaa ruiskutuspainetta, mutta silloinen korkeimman ruiskutusaineen tuottava järjestelmä, pumppusuutindiesel, ei sopinut yhteen V-moottorin kanssa, jossa oli vain yksi nokka-akseli. Nokka-akseliin ei olisi mahtunut niin montaa ruiskutusnokkaa, eivätkä työntötangot ja keinu-
vivut olisivat sopineet niin kovien voimien välittämiseen, kuin mitä ruiskutuksessa olisi vaadittu.

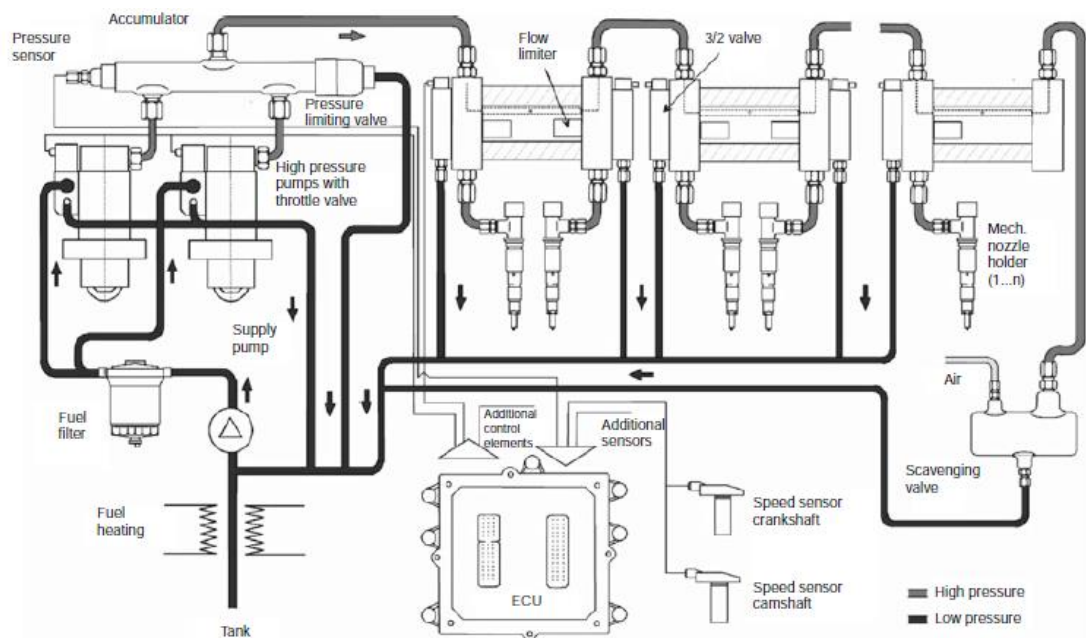
Lopulta HEUI-ruiskutuksen pioneeri Caterpillar toi vuonna 1993 markkinoille yhdessä International Truck & Engine Corporationin kanssa kehittämänsä kaupallisen version,

jota käytettiin 7,3-litraisessa powerstroke-moottorissa. Siinä matalapainepumpun tuottamaa 60 – 280 baarin paineista polttoainetta ruiskutettiin sylintereihin servo- ohjattujen pumppusuuttimien avulla. (2, 76.)

3 COMMON RAILIN TOIMINTAPERIAATE JA KOMPONENTIT

3.1 Polttoaineen kierto

Moottorille tuleva polttoaine kulkee virtauksensäätöventtiilin läpi ruiskutuspumpuille. Venttiiliä ohjataan sähköisesti sen mukaan, minkä suuruinen ruiskutuspaineta halutaan. Ruiskutuspumput nostavat polttoaineen paineen installaatiosta riippuen useaan sataan, jopa kahteen tuhanteenkin baariin. Pumputta polttoaine kulkeutuu välivarastoina toimiviin paineakkuihin tai polttoainekiskoon, riippuen millaista rakennetta käytetään. Näihin on aina sijoitettu varoventtiili liian korkean paineen varalta. Kiskosta polttoainetta otetaan ruiskutussuuttimille, joiden toiminnassa syntyvä vuotopolttoaine palautetaan takaisin kiertoon matalapainepuolelle.



Kuva 2. Raskasöljykierto. (3, 169)

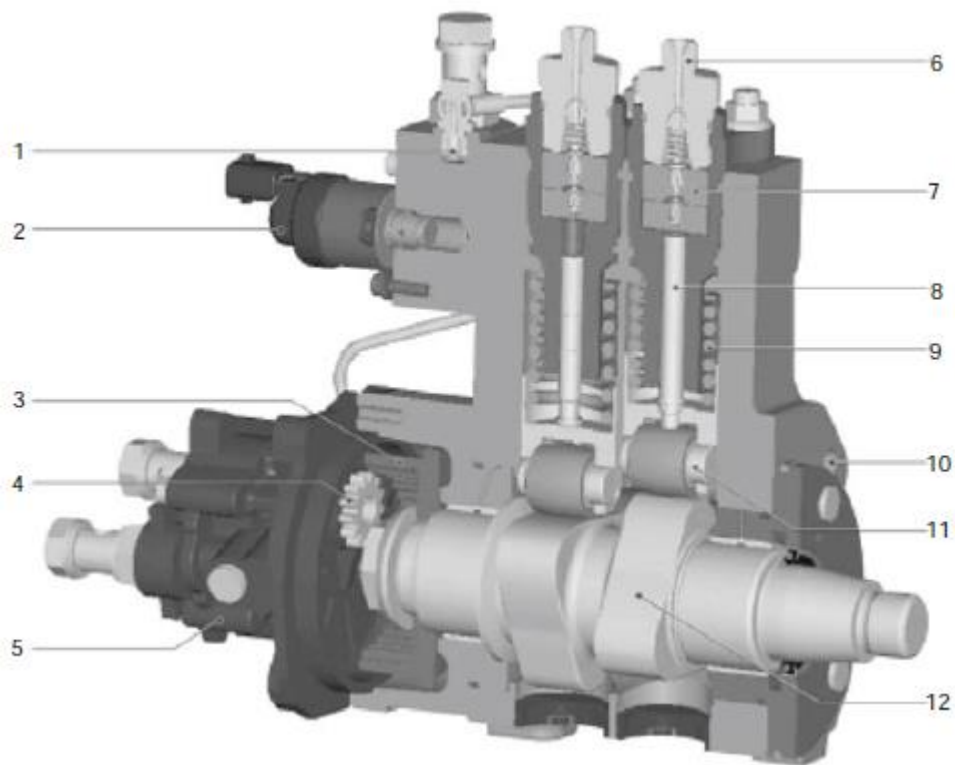
Raskasöljykäytössä on oltava mahdollista kierrättää polttoainetta ruiskutusjärjestelmän läpi esilämmitystä varten. Usein tässä käytetään apuna varoventtiiliä, jonka läpi polttoaine pääsee takaisin kiertoon ja uutta lämmintä polttoainetta tulee tilalle lämmit-

täen systeemiä. Yllä olevassa kuvassa on esiteltynä laivadieselille tyypillinen modulaarinen yhteispaineruiskutuksen polttoainejärjestelmä. Tämän tyyppiset ratkaisut ovat usein jälkiasennettavissa, mikä pitkäikäisissä laivadieselissä on etu. Kaikki korkeapainepuolen osat ovat kaksinkertaisella seinämällä ja vuotoilmaisulla varustettuja. (3, 165- 169.)

3.2 Ruiskutuspumppu

Korkeapainepumpun, eli ruiskutuspumpun, tehtävä on nostaa polttoaineen paine muutamasta baarin siirtopaineesta aina jopa noin 2000 baarin ruiskutuspaineeksi asti. Yleensä kyseessä on käyttövoimansa moottorin kampiakselilta saava pumppuyksikkö, joka koostuu useista pumppuelementeistä. Poikkeuksiakin on, esimerkiksi nelitahtiset Wärtsilän moottorit, joissa ruiskutuspumput ovat perinteisillä paikoilla hotboxissa.

Pumppuelementit ovat mäntäpumppuja, joita käytetään nokka- akselilla. Nokkien määrä vaihtelee. Moni valmista suosii useampinokkaista akselia, jotta yhden kierroksen aikana saadaan useampi pumppausliike aikaiseksi ja näin saadaan tuotettua painetta matalillakin kierroksilla. Koska pumppu osallistuu ruiskutuksen ajoittamiseen, ei nokkaprofiilien tarvitse olla niin rajuja kuin perinteisessä ratkaisussa. Tämän ansiosta pumput rasittuvat vähemmän ja niiden elinikä on pidempi. Ruiskutusta säädetään aivan muilla tavoin kuin pumpun mäntää kiertämällä. Pumppujen männissä ei ole helixiä taikka säätövivustoa, joten rakenne on sen osalta yksinkertaisempi. Koska pumput ovat yhtenä pakettina ja tuottavat painetta samaan linjaan, ei yhden pumppuelementin vikaantuminen juurikaan vaikuta moottorin käyntiin, kun taas perinteisellä ruiskutuksella varustetussa se aiheuttaisi yhden sylinterin menetyksen.



Kuva 3. Common rail -ruiskutuspumppu. (3, 154)

Kuvan 3 esimerkkinä toimivan ruiskutuspumpun rakenne: 1. Polttoaineen syötön katkaisu; 2. Virtausventtiili; 3. Vaihde; 4. Hammasratas; 5. Polttoaineen siirtopumppu; 6. Korkeapainelähtö; 7. Kaksiosainen imu/korkeapaineventtiili; 8. Pumpun mäntä eli plungeri; 9. Männän jousi; 10. Voiteluöljyn tulokanava; 11. Rullanostaja; 12. Nokka-akseli.

3.3 Polttoaineventtiilit

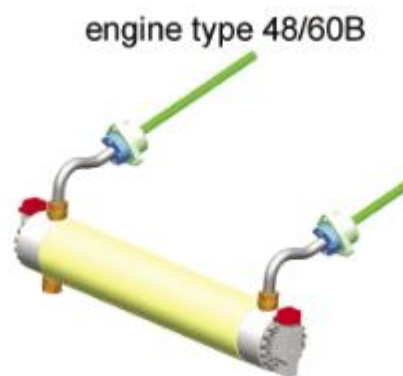
Polttoaineventtiilit eli ruiskutussuuttimet syöttävät polttoaineen sylinteriin. Ensiarvoisen tärkeää näissä on korkea ruiskutuspain ja nopea reagointi, eli venttiilin neula avautuu ja sulkeutuu mahdollisimman nopeasti. Yhteispaineruiskutuksen sähköisesti ohjattujen ruiskutussuuttimien myötä voidaan suorittaa useita eripituisia ruiskutuksia yhden kierron aikana. Siinä missä pienempien moottoreiden suuttimia voidaan ohjata suoraan pietsosähköisesti niin että sähkövirralla saadaan aikaan suuttimen neulan nos-

to, niin moottorikoon kasvaessa joudutaan turvautumaan monimutkaisempiin konsteihin. Raskasöljykäytössä kuumuus asettaa omat haasteensa elektroniikan suhteen.

Laivadieseleiden ruiskutussuuttimet voidaan tänä päivänä jakaa karkeasti kahteen ryhmään: ohjausöljyllä ohjattuihin ja polttoainepaineen avulla ohjattuihin. Käytettäessä ohjausöljyä periaate on seuraavanlainen: ohjauselektroniikka käyttää solenoidiventtiiliä, joka päästää ohjausöljyä lävitseen. Tällä öljynpaineella ohjataan ruiskutussuuttimen neulan avautumista ja sulkeutumista. Polttoainepainetta käytettäessä ohjausöljyjärjestelmä jää kokonaan pois, joten se on sinällään yksinkertaisempi. Periaate on kuitenkin sama: solenoidiventtiili ohjaa korkeapaineisen polttoaineen painetta suuttimen eri osissa, joka saa aikaan suuttimen neulan liikkeen. Eri valmistajien ruiskutussuuttimet poikkeavat toisistaan paljonkin ja ne ovat esiteltynä erikseen myöhemmissä kappaleissa.

3.4 Polttoainekisko, paineakku

Yhteispaineruiskutusjärjestelmän nimi juontuu kaikille ruiskutussuuttimille yhteisestä polttoainekiskosta, englanniksi Common railista. Tähän kiskoon varastoituu polttoainepumpun tuottama korkeapaineinen polttoaine, josta sitä sitten otetaan kullekin sylinterille tarpeen mukaan. Kiskon tilavuuden on oltava riittävän suuri, jotta paine siinä pysyy vakaana joka tilanteessa. Silti sen on oltava riittävän pieni, jotta paine nousee nopeasti moottorin käynnistyessä.



Kuva 4. MAN B&W:n Kahden sylinterin paineakku (6)

Toisinaan polttoainekiskoa ei käytetä paineakkuna, vaan pelkästään polttoaineen jakeluun sylintereille ja paineakut ovat erikseen esimerkiksi suuttimien yhteydessä, jolloin kiskon koko voidaan jättää hyvin pieneksi. Erillisiä paineakkuja käytettäessä ruiskutusten aiheuttamat painenvaihtelut vaikuttavat vähemmän viereisten suutinten toimintaan.

Toisin kuin perinteisessä järjestelmässä, jossa erittäin korkea polttoaineen paine esiintyy vain hetkittäin, korkeapainepumpun jälkeisellä alueella on aina ruiskutusaineen käydessä. Turvallisuussyistä putket, paineakut ja polttoainekiskot joudutaankin suunnittelemaan erittäin vahvoiksi ja kaksinkertaisella seinämällä, jotta vuodon sattuessa polttoainetta ei vielä välttämättä pääse ulos. Suuremmissa moottoreissa polttoainekiskon pituus muodostuu usein ongelmaksi rasituksen ja lämpölaajenemisen takia. (6) Ongelma on mahdollista ratkaista tekemällä polttoainekiskosta vahvempi, mutta osa valmistajista on tässä tilanteessa päätenyt jakamaan polttoainekiskon useisiin pienempiin osiin.

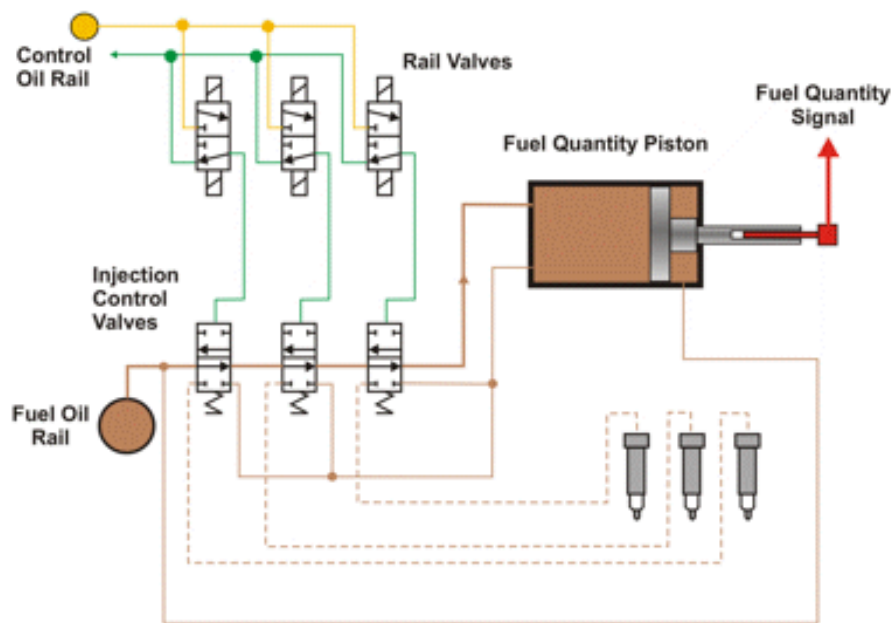
3.5 Virtauksensäätö

Käytännössä yhteispaineruiskutuspumppu on niin tehokas, että se tuottaisi vapaalla polttoaineensyötöllä maksimaalisen paineen hyvinkin matalilla kierroksilla. Ruiskutuspainetta on mahdollista säätää polttoainekiskoon sijoitetulla venttiilillä, joka päästää polttoainetta pois kiskosta pitäen näin halutun paineen. Tämänlainen paineensäätö olikin käytössä varhaisemmissa yhteispaineruiskutusmoottoreissa, mutta se on nopeasta reagoinnistaan huolimatta epätaloudellinen ratkaisu, sillä pumppu kuluttaa täyden työn tehdessään enemmän energiaa, ja polttoainetta kierrätetään turhaan järjestelmän läpi. Nykyään pääasiallinen paineensäätötapa on rajoittaa polttoaineen virtaus ruiskutuspumppulle sähköisesti ohjatulla virtausventtiilillä. Tällöin paineistettavaa polttoainetta on vähemmän ja pumpput kuluttavat vähemmän energiaa. Myös yhdistetty korkea- että matalapainepuolen säätö on mahdollinen ratkaisu. (3, 149.)

Vaikka korkeapainepuolen ruiskutusaineen säätöä ei käytettäisi, on kiskoissa ja paineakuissa silti oltava aina mekaaninen ylipaineventtiili, joka estää polttoaineen paineen nousun liian korkealle. Samaten jos paineensäätö ei jostain syystä toimisi, moottoria on mahdollista silti käyttää ylipaineventtiilin avulla. Silloin ruiskutuspainetta ei tietenkään voi ohjata, mutta se pysyy turvallisissa rajoissa. (3, 156.)

3.6 Servohydrauliikka

Laivadieseleissä, erityisesti kaksitahtisissa, erillisen servohydrauliikan avulla toimiva polttoaineenruiskutus on melko suosittu käytäntö, tarjoaahan se lisätuna mahdollisuuden käyttää moottorin venttiileitä hydraulisesti. Tämän seurauksena nokka- akseli jää kokonaan pois. Hydraulisesti ohjatut venttiilit ovat nykyään käytössä yksinomaan kaksitahtisissa, mutta tekniikkaa on kaavailtu nelitahtisiin, esimerkiksi Wärtsilän EHVA (7).



Kuva 5. Sulzerin servoöljyohjattu ruiskutusjärjestelmä. (8)

Yllä olevassa kuvassa on esimerkkinä toimiva Sulzerin kaksitahtimoottorin ruiskutusjärjestelmä. Sähköohjatut kiskoventtiilit (Rail valves) päästävät ohjausöljyn polttoaineen kulkua sääteleville ruiskutuksen ohjausventtiileille (Injection control valves). Ohjausöljy toimii näiden ruiskutusventtiilien käyttövoimana avaten polttoaineelle tien ruiskutussuuttimille. Samaa ohjausöljyä käytetään pakovernttiilien aukomiseen, käyttäen yksinkertaisesti solenoidia ja hydraulista sylinteriä. Solenoidi aukaisee venttiilin, joka päästää ohjausöljyn sylinteriin painaen pakovernttiiliä käyttävän männän ylös. Mäntä painaa systeemiöljyn avulla pakovernttiilin auki, aivan kuten perinteisessäkin kaksitahtidieselissä. (9.)

3.7 Anturit

Yhteispaineruiskutuksen sähköisen ohjauksen takia moottoriin ja kaikkeen sen toimintaan liittyvään vaaditaan jonkinlainen anturi ja kriittisemmissä paikoissa kaksi, joista toinen varalle.

Eräs tärkeimpiä on tietysti ruiskutuspaineanturi, joka on usein asennettu polttoainekis-koon tai joskus ruiskutuspumpun yhteyteen. Sen tehtävänä on viestiä ohjausyksikölle polttoaineen paine, jotta moottorinohjaus voi tehdä tarvittavat toimenpiteet paineen korjaamiseksi haluttuun, mikäli tarvis. Tärkeimpiin lukeutuu myös kampiakselin asentotunnistin, minkä avulla ohjausyksikkö osaa ajoittaa ruiskutuksen joka sylinteriin oikein. Sen rinnalla käytetään usein vielä kampiakselin kierrosnopeusanturia. Kierrosnopeusanturin vikaantuessa kampiakselin asentotunnistin kykenee monissa järjestelmissä osittain korvaamaan sen toiminnan ja näin pitämään moottorin käyntikuntoisena. (3, 184–185.)



Kuva 6. Sulzer RT-flex kampiakselin asentotunnistin. (10)

Yllä mainittujen lisäksi moottorissa esiintyy lukuisia muita antureita, joista mainittakoon muun muassa moottorin turboahtimen jälkeen asennettu ilmanpaineanturi. Sen kautta moottorinohjaus pystyy määrittelemään ruiskutettavan polttoaineen määrän suhteessa ilmaan tehokkaasti. Näin voidaan ehkäistä savutusta, kun moottoriin ei syötetä liikaa polttoainetta suhteessa palamisilmaan. Lämpöantureita tarvitaan mittaa-

maan muun muassa polttoaineen lämpö, sylinterikohtainen pakolämpö ja ahtoilman lämpötila. Suuren anturimäärän ansiosta moottorinohjaus pystyy näkemään hyvin tarkasti, mitä moottorissa tapahtuu ja säätämään ruiskutusta kohdalleen.

3.8 Moottorinohjaus

Yhteispaineruiskutus on mahdollista toteuttaa täysin mekaanisesti ja ennen tietokoneita näin tehtiinkin muun muassa Doxford-moottoreissa. Nykyaikaisen nopean elektronikan kanssa toteutettu ruiskutusjärjestelmä on valtava harppaus eteenpäin, sen tuomat lisäedut ovat matalampi kulutus ja päästöt, paremmat käyttöominaisuudet ja paljon muuta. Kaikkia ruiskutusjärjestelmiä on mahdollista ohjata sähköisesti, mutta yhteispaineruiskutus on näistä ehkäpä joustavin ja monipuolisin, sillä ruiskutustapahtuma, että ruiskutuspaine ovat käytännössä katsoen täysin tilanteen mukaan tietokoneen säädettävissä. Yksinkertaistettuna toiminta on seuraavanlainen: Polttoainekiskon paineanturi kertoo moottorinohjaukselle sen hetkisen paineen, jota ohjausyksikkö vertaa valmiiksi ohjelmoituihin arvoihin ja tekee muutokset sen perusteella, miten paine poikkeaa käskemällä polttoaineen virtausventtiiliä sulkeutumaan tai avautumaan enemmän. Ruiskutus ajoitetaan kampiakselin asennon ja nopeuden mukaan. Koska mikään ei mekaanisesti ole tekemisissä ruiskutuksen kanssa paitsi ruiskutuspumppu, joka ainoastaan tekee painetta varastoon, ei mikään myöskään rajoita ruiskutusta. Tämän ansiosta onkin oikeastaan ohjauselektronikan kyvyistä kiinni, mihin kaikkeen ruiskutusjärjestelmä pystyy.

Käytännössä nykyaikainen moottorinohjaus pystyy suuren antureilta saatavan tietomäärän ansiosta itsenäisesti säätämään palamisseosta mahdollisimman lähelle optimaalista ja sopeutumaan eri tilanteisiin, kuten matalille kuormille ja kierroksille siirtymistä. Lisäksi tämä kaikki suuri tietomäärä palvelee myös käyttäjää, sillä moottorinohjaus voi itsekin suorittaa vikadiagnosointia. Koska kaikki ruiskutuskartat ja muu moottorin käyntiin vaikuttava data on sähköisessä muodossa, muutoksia voi tehdä suhteellisen helposti, esimerkiksi erilaiseen polttoaineeseen siirryttäessä. Toisaalta ohjausjärjestelmä on haavoittuvainen samasta syystä, ilman tietoa se ei kykene tekemään päätöksiä koska ne eivät perustuisi mihinkään. Moottori ei kuitenkaan saa muuttua muutaman anturin menetyksestä käyttökelvottomaksi, joten valmistajat ovat kehilleet erilaisia varotoimia tilanteiden varalle. Esimerkiksi MAN B&W:n keskinopean dieselin yhteispaineruiskutusjärjestelmässä tärkeimmät komponentit on kahdennettu ja

polttoainekiskon ylipaineventtiilin lisäksi siinä on paineensäätöventtiili polttoainepumppujen virtausventtiilin rikkoutumisen varalle. Myös ohjausyksiköitä on kaksi, kumpikin vastaa puolesta moottorista. Mikäli toinen rikkoutuu, jäljelle jäävä kykenee hoitamaan koko moottorin toiminnot. (6.)

4 EDUT MEKAANISEEN RUISKUTUKSEEN VERRATTUNA

Yhteispaineruiskutus ja muut kehittyneet sähköiset ruiskutusjärjestelmät tarjoavat merkittäviä etuja ja lisäominaisuuksia, kuten vähentyneet päästöt ja kulutus, helpommat moottorin säädöt ja valvonta, sekä komponenttien pidempi elinikä. Seuraavaksi perehdytään siihen, mitä kaikkea ne tarjoavat ja miksi.

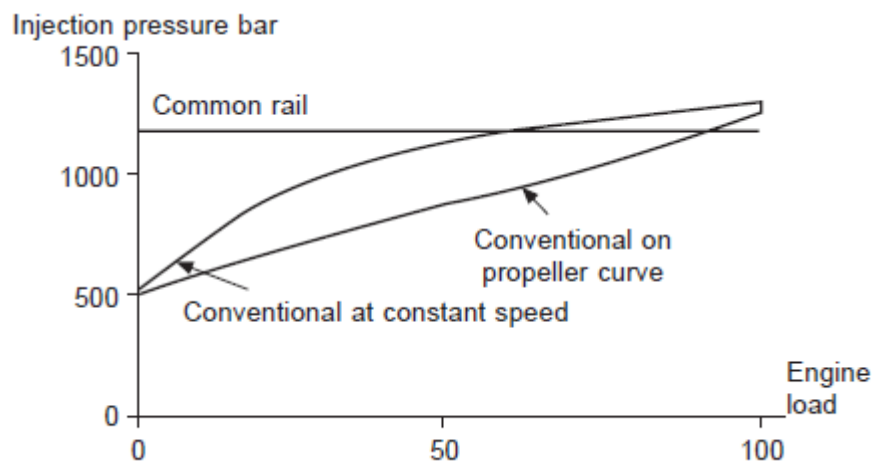
4.1 Tekniikka

Aloitetaan perinteisestä mallista (PLN). Nokka-akselin käyttämät ruiskutuspumput ruiskuttavat polttoaineen palotiloihin ennalta määrätyllä hetkellä, syöttötangon asento määrää ruiskutettavan polttoaineen määrän. Ruiskutus tapahtuu vain kerran eikä palotapahtumaa hallita kovinkaan hyvin, paine nousee hyvin nopeasti aiheuttaen dieselmoottorille ominaisen käyntiäänen. Esiruiskutuksen avulla saadaan pehmennettyä tätä vaihetta ja näin saavutetaan hiljaisempi käyntiääni. (2, 26) Tänä päivänä tämä tekniikka on viety hyvin pitkälle ja kaikki komponentit optimoitu noin 85 % kuormalle niin, ettei perinteinen ratkaisu juurikaan häviä ominaisuuksissa yhteispaineruiskutukselle. Eroa kuitenkin alkaa syntyä sitä enemmän, mitä enemmän poiketaan tästä. Moottorin kierrosnopeuden laskiessa laskee myös ruiskutuspaine ja pian saavutetaan raja, jonka jälkeen matalan ruiskutuspaineen vuoksi polttoainesumu on huono ja johtaa savutukseen ja alentuneeseen tehoon, jopa siinä määrin ettei moottori kykene toimimaan propulsiovoimanlähteenä. Syy ruiskutuspaineiden tavoitteluun on että mitä korkeammalla paineella ruiskutetaan, sitä parempi ilma- polttoaineseos sylinterissä saavutetaan johtaen tehokkaampaan palamiseen ja savutuksen vähenemiseen. (2, 26- 27.)

Nokka-akselit ovat olleet osa dieselmoottoria alusta alkaen ja ovat sitä vieläkin. Ne ovat olleet kätevin tapa käyttää venttiilikoneistoa ja ruiskutuspumppuja. Vaikka nokkaprofiilit ovat kehittyneet ja on kehitelty ajoitusta muuttavia laitteita, on nokkaakseleilla omat rajoitteensa. Yhteispaineruiskutuksen myötä nokka-akselin käyttämät

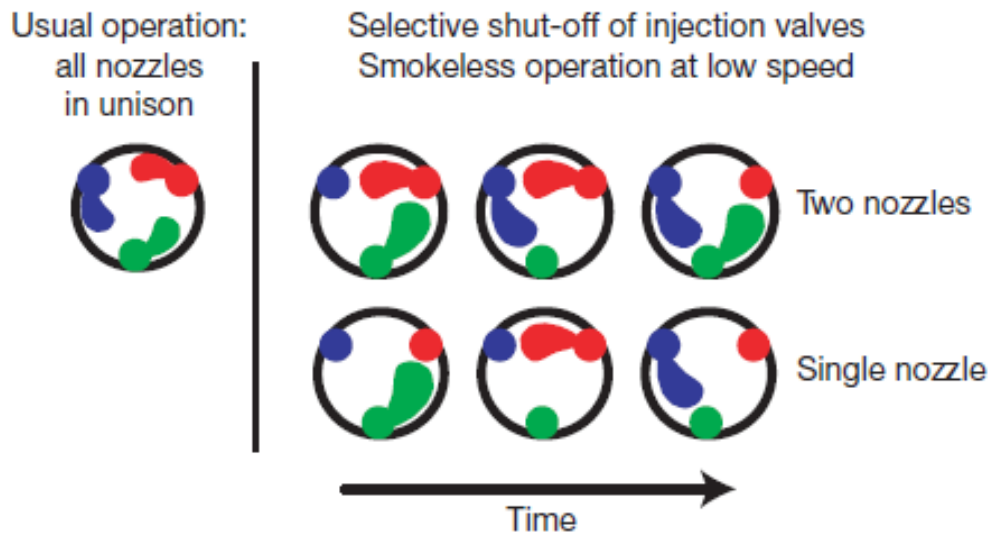
ruiskutuspumput ovat jääneet historiaan ja niinpä kaksitahtidieseleissä nokka-akselilla on enää pakoverventtiilit hoidettavanaan. Käytettäessä servo-ohjattuja polttoaineventtiileitä tai hydraulisia ruiskutuspumppuja voidaan sama hydraulikkajärjestelmää hyödyntää myös pakoverventtiilien aukomiseen ja esimerkiksi Sulzer ja MAN B&W näin tekevätkin. Paitsi että moottorista tulee yksinkertaisempi (11), voidaan näin pakoverventtiilin aukeamis- ja sulkemisajankohtaa sekä venttiilin noston määrää säätää vapaasti käynnin aikanakin ja näin parantaa moottorin ominaisuuksia monella tapaa.

Yhteispaineruiskutuksen suurimpia etuja on ruiskutuspaineen tasaisuus. Pumppuelementtejä on useita, niitä käyttävässä akselissa voi olla monta nokkaa ja sopiva käyttövoiman välitys kampiakselilta takaavat, että korkea ruiskutuspainee saavutetaan jo hyvin pienillä käyntikiirroksilla, ja se voidaan pitää halutun suuruisena koko kierrosalueen läpi.



Kuva 7. Common railin ja perinteisen ruiskutuksen paine kuorman funktiona. (1, 251)

Yhteispaineruiskutus on sähköisesti ohjattua ja sitä voidaan säätää hyvinkin tarkasti. Voidaan suorittaa esi- ja jälkiruiskutuksia varsinaisen ruiskutuksen ohella ja jos sylinteriä kohden on useampi suutin, voidaan niitä ohittaa yksitellen matalilla kuormilla ja sylintereitä jättää välistä. Eli eri sylintereille on mahdollista syöttää erisuuruiset määrät polttoainetta eri ajoituksilla.



Kuva 8. Sulzerin RT-flex moottorin erilaisia ruiskutusmoodeja. Matalilla kuormilla ja kierroksilla jätetään suutin tai kaksi pois savutuksen ehkäisemiseksi. (9)

Pitkälle viedyn automatiikan ja suuren moottorilta saatavan datan ansiosta vikadiagnosointia voidaan suorittaa suoraan moottorin tietokoneen kautta. Kun vikatiedot ovat sähköisessä muodossa ja täten helposti eteenpäin välitettävissä, moottorin valmistaja voi avustaa vianhaussa vaikka etänä. Laivoilla tämä on suuri etu, apua voidaan antaa mihinpäin maailmaa tahansa.

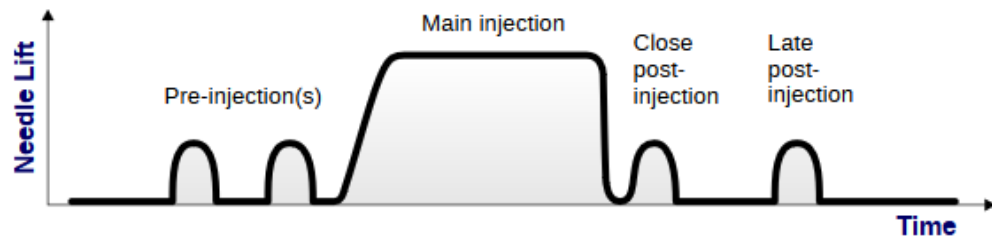
4.2 Päästöt ja kulutus

Nykyään laivan päästöt ovat merkittävässä osassa: matkustajalaivoissa olematon savutus antaa ympäristöystävällisen mielikuvan. Erikoisalueilla, kuten Alaskassa tai Galapagos-saarilla liikaa savuttava alus voidaan kieltää liikkumasta siellä kokonaan. Etenkin satamissa, eli siis koneiden käynnistysvaiheessa ja matalilla kierroksilla manöveeratessa perinteinen laivadiesel savuttaa väistämättä rakenteestaan johtuen. Hitaasti käyvän moottorin nokka-akseli pyörii myös hitaammin ja täten ruiskutuspumpun männän liike on rauhallisempaa. Tästä johtuen ruiskutus tapahtuu matalammalla paineella ja polttoaine ei sekoitu kunnolla sylinterissä.

Alla olevassa kuvaajassa näkyy ruiskutussuuttimen neulan nosto ajan funktiona. Siinä ennen varsinaista ruiskutusta on suoritettu kaksi esiruiskutusta ja kaksi jälkiruiskutusta. Esiruiskutuksella hillitään paitsi melua, myös NO_x-päästöjä. Perinteinen kertaruiskutus aikaansaa sen, että ruiskutuksen alussa palotilaan päätynyt polttoainesumu syt-

tyy omia aikojaan palaen nopeasti ja hallitsemattomasti. Edellä mainitun kaltainen palotapahtuma saa aikaan hyvin nopean lämpötilan ja paineen nousun sylinterissä, mistä aiheutuu dieselmoottorille ominainen käyntiääni. Käyttämällä esiruiskutusta voidaan tätä palotapahtuman kulkua hillitä, jolloin käyntiääni hiljenee ja kovassa kuumuudessa syntyvät NO_x-päästöt vähenevät.

Jälkiruiskutuksen avulla taas vähennetään savutusta, mikä johtuu ruiskutuksen lopun matalasta paineesta ja sylinterissä vallitsevista epäedullisista olosuhteista. Hiilivedyt eivät ehdi hiukkasiksi muututtuaan saavuttamaan syttymisaluettaan, mikä ilmenee hiukaspäästöinä. Ruiskuttamalla polttoainetta heti varsinaisen pääruiskutuksen jälkeen voidaan toisinaan saada uutta eloa palotapahtuman loppuun. Myöhemmällä jälkiruiskutuksella taas vaikutetaan pakokaasujen lämpötilaan. (2, 29–32.)



Kuva 9. Esi-, Pää- ja jälkiruiskutukset ajan funktiona. (20)

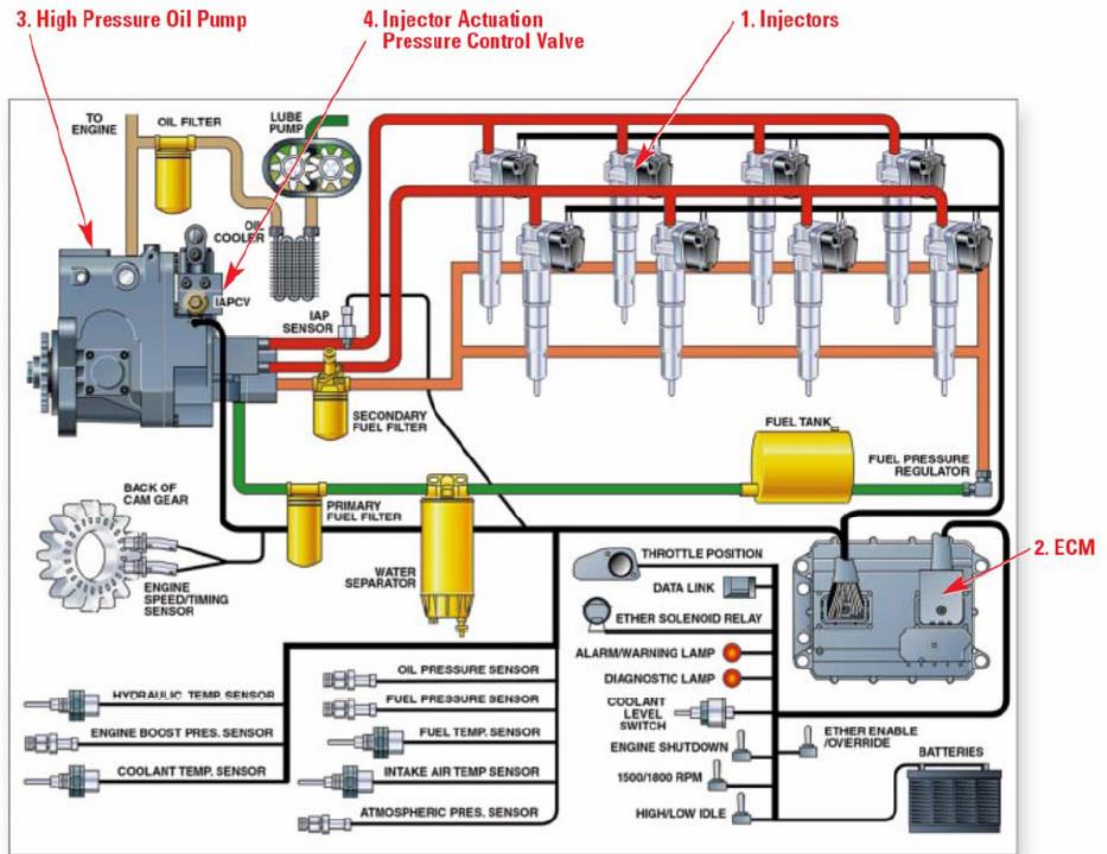
Itse varsinaisella pääruiskutuksella on myös oma roolinsa: Hidas suuttimen neulan nousu auttaa esiruiskutuksen tavoin NO_x- ja meluongelmiin ja nopea suuttimen sulkeutuminen hiilivety- ja partikkelipäästöihin. (2, 25–32) Paras tulos saavutetaan, kun ruiskutusaine nousee ruiskutuksen loppua kohden polttaen noen pois, ikävä kyllä yhteispaineruiskutuksessa tämä ei ainakaan vielä ole mahdollista, toisin kuin EUP- ja EUI-järjestelmillä (2, 88–98).

Liitteessä (18) olevissa kuvissa on vertailussa Wärtsilän perinteinen ja yhteispaineruiskutusmoottori. Kuten näkyy, ero on parhaimmillaan merkittävä ja voi vaikuttaa paljonkin ihmisten mielipiteeseen laivan päästöjen suhteen kaikissa kolmessa kohdassa perinteinen ruiskutusjärjestelmä on ulkona sille tarkoitettulta toiminta-alueeltaan, jolle kaikki sen komponentit on mitoitettu.

Ylimmässä kuvaparissa moottorit käynnistetään. Yhteispaineruiskutusmoottori alkaa heti tuottamaan täydelliseen palamiseen vaadittavan ruiskutuspaineen, mikä näkyy pienempänä savutuksena verrattuna perinteiseen. Keskimmaisessa kuvaparissa ajetaan 30 % kuormalla. Perinteisellä ruiskutusjärjestelmällä varustettu moottori ruiskuttaa polttoaineen liian matalalla paineella, eikä se kaikki ehdi palamaan, etenkin kun paloilmaa voi myös olla tarkoitettua vähemmän turboahtimen saadessa vähemmän pakokaasua. Yhteispaineruiskutusmoottori myöhäistää ruiskutusta matalilla kuormilla ja ruiskuttaa riittävän vähän polttoainetta korkealla paineella jotta kaikki palaisi, eikä savutusta esiinny. Alimman kuvaparin tilanne saadaan, kun matalilla kierroksilla ja kuormalla polttoaineen syöttöä lisätään äkisti. Turboahdin ei ehdi mukaan heti ja moottori saa vähän paloilmaa, mutta paljon polttoainetta matalalla paineella ruiskutettuna. Polttoaine palaa huonosti ja tuloksena on paksua mustaa savua. Yhteispaineruiskutusmoottori laskee itse millaisen määrän polttoainetta se ruiskuttaa ja millä hetkellä savutuksen minimoimiseksi. (1, 83 – 85.)

5 HEUI-RUISKUTUKSEN TOIMINTAPERIAATE

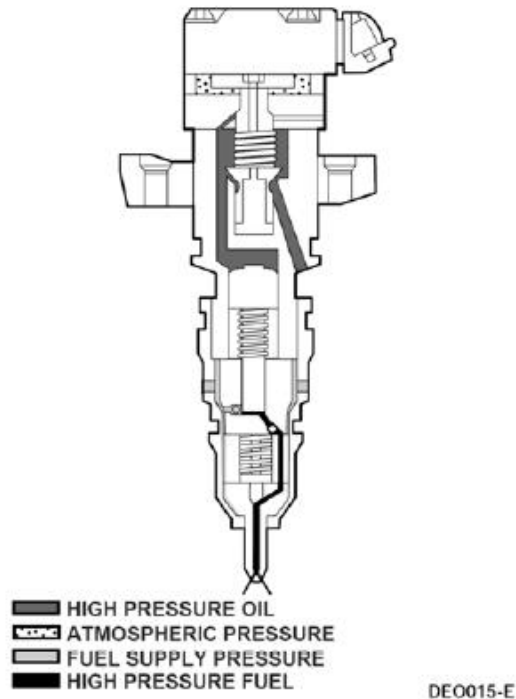
Caterpillarin tunnetuksi tekemä HEUI-tekniikka saavutti jo 90-luvulla vankan jalansijan ja se on monesti tänä päivänäkin varteenotettava vaihtoehto yhteispaineruiskutukselle. Ruiskutusaine luodaan kahdessa vaiheessa: ensin matalapainepumppu nostaa polttoaineen paineen 2 – 5,5 baariin ja pumpulta polttoaine jakautuu common railin tapaan putkia pitkin suuttimille. Suuttimiin on liitettynä sähköisesti ohjattu hydraulinen, voiteluöljyä servoöljynä käyttävä ruiskutuspumppu joka suorittaa ruiskutuksen. Järjestelmän etuna on erittäin korkea ruiskutusaine ja melko laaja ruiskutuksen säätö, esi- ja jälkiruiskutuksineen. Koska varsinainen ruiskutusaine tuotetaan ruiskutussuuttimessa, luokitellaan HEUI pumppusuutinjärjestelmäksi (12).



Kuva 10. Caterpillarin HEUI-järjestelmä. (12)

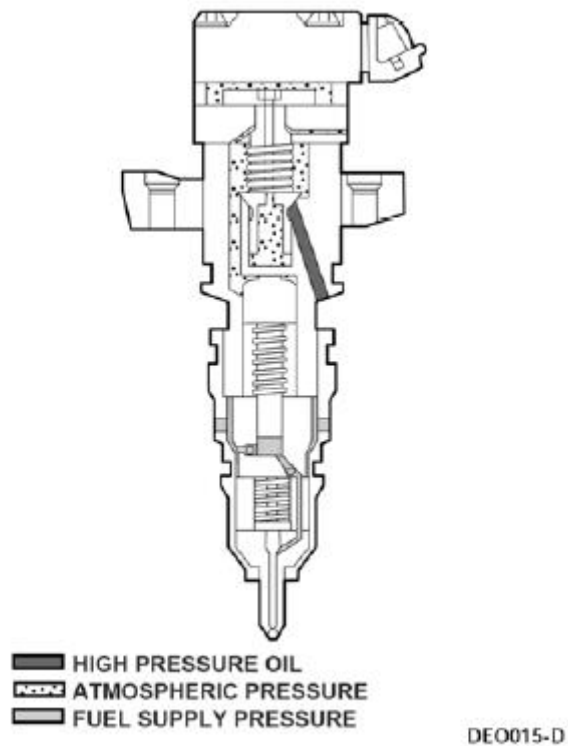
HEUI-suuttimen rakenne koostuu sen yläosassa olevan solenoidin ohjaamasta servoöljyventtiilistä (poppet valve), vahvistinmännästä jota hydraulikkaöljyllä käytetään sekä suuttimen kärjestä. Ruiskutusta säädelään hydraulioöljyn paineen avulla ja solenoidiventtiilin aukioloaikaa säätämällä. Caterpillarin HEUI-ruiskutusta käytetään muun muassa 3116, 3126, C7 ACERT ja C9 ACERT -moottoreissa.

Suuttimen toiminta: täyttövaiheessa vahvistinmännällä ei ole painetta ja jousi pakottaa sen yläasentoonsa. Plungerin alle virtaa polttoainetta, kunnes tila on täytetty takaiskuventtiilit estävät polttoaineen takaisinvirtauksen ruiskutuksen yhteydessä.



Kuva 11. Ruiskutus. (12)

Ruiskutusvaiheessa solenoidiin kytketään virta jolloin se avaa venttiilin joka päästää korkeapaineisen öljyn vahvistinmännän päälle, sulkien samalla öljyn paluureitin. Suuttimeen kertyvä paine alkaa työntämään vahvistinmäntää. Vahvistinmäntä on hydraulitoiminen kaksipuolinen mäntä, jonka pinta-ala on seitsemän- tai kahdeksankertainen polttoainepuolen mäntään verrattuna. Näin polttoaineen paine moninkertaistuu hydrauliiikan paineeseen nähden.



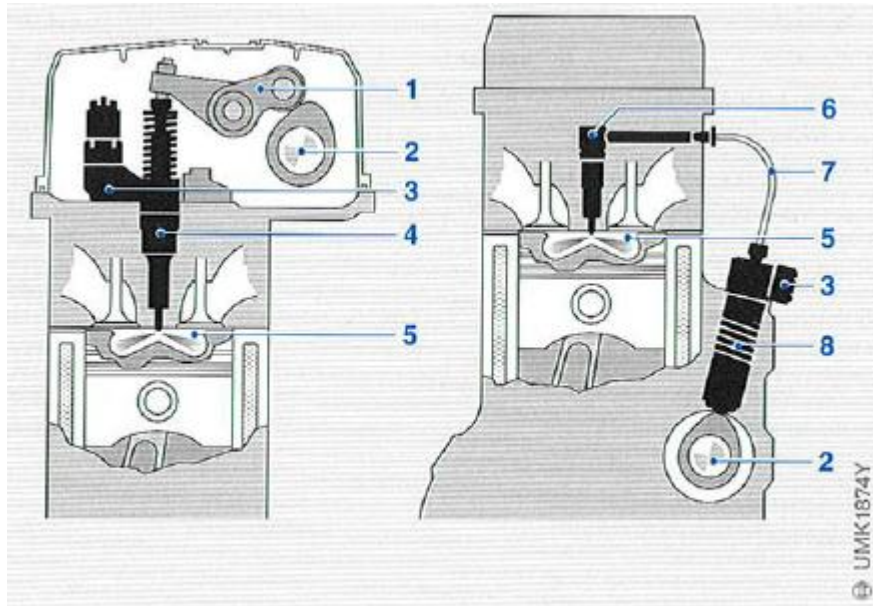
Kuva 12. Ruiskutus on loppunut (12)

Ruiskutus päätetään kun solenoidilta häviää virta ja hydraulikkaöljyn ohjausventtiili sulkeutuu avaten samalla paluukanavan. Vahvistinmännältä häviää paine ja jousi vetää sen yläasentoonsa. Kun näin käy, romahtaa polttoaineen paine ja suutinneulan jousi painaa suuttimen neulan alas katkaisten ruiskutuksen. (12.)

6 EUI- JA EUP- RUIKUTUKSEN TOIMINTAPERIAATE

EUI ja EUP, eli sähköohjattu pumppusuutin ja ruiskutuspumppu ovat teknisesti lähipänä perinteistä ruiskutusjärjestelmää. Yksinkertaisimmillaan toteutus on muuten sama, mutta ruiskutettavan polttoaineen määrää säädetään sähköisesti ohjatulla vuotoventtiilillä. Nokka-akselin käyttämä Ruiskutuspumppu pumppaa polttoainetta jota vuotoventtiili ohjaa paluulinjaan ja kun halutaan suorittaa ruiskutus, venttiili sulkeutuu jolloin paine kasvaa ja pakottaa ruiskutussuuttimen auki. Koska pumppuelementistä jää syötönsäätö pois ja rakenne yksinkertaistuu, kykenevät ne tuottamaan erittäin suuren ruiskutuspaineen verrattuna muihin ruiskutusjärjestelmiin. (2, 85). Haittapuolena

ruiskutuksen ajoituksen säätömahdollisuudet ovat pienet, sillä ruiskutustapahtuma on riippuvainen myös nokka-akselin asennosta.



Kuva 13. Vasemmalla EUI ja oikealla EUP. (4, 239)

1. Keinuvipu; 2. Nokka-akseli; 3. Solenoidiventtiili; 4. Pumppusuutin; 5. Moottorin palotila; 6. Polttoainesuutin; 7. Korkeapaineputki; 8. Ruiskutuspumppu

EUP-järjestelmä on helppo jälkiasentaa, sillä ruiskutuspumput muistuttavat hyvin paljon perinteisiä malleja niin toiminnaltaan kuin mitoiltaan. (2, 82) Parempia ominaisuuksia haettaessa on kehitetty kahta vuotoventtiiliä käyttävä EUI/EUP. Siinäkin vuotoventtiili määrittelee milloin suuttimessa on paine. Sulkemalla venttiili aikaisin suuttimeen tulee suurempi paine kuin jos venttiili suljettaisiin myöhemmin. Näin saadaan aikaiseksi ruiskutuspaineensäätö. Ruiskutussuutin on rakenteeltaan samanlainen kuin polttoainetta ohjausöljynään käyttävä common rail-moottorin suutin. Kahden venttiilin järjestelmä mahdollistaa jo esi- ja jälkiruiskutukset, mutta järjestelmän luonteesta johtuen jokainen ruiskutus on edellistä korkeammalla paineella. Tosin tämä ei ole huono asia, usein matalapaineista esiruiskutusta ja korkeapaineista pää- ja jälkiruiskutusta pidetään hyvänä ominaisuutena. (2, 89) Vaikka EUI- ja EUP- ruiskutus häviääkin joissain asioissa common railille, puoltaa etenkin EUI silti paikkaansa kaikista korkeimman mahdollisen ruiskutuspaineen omaavana ratkaisuna (4, 238).

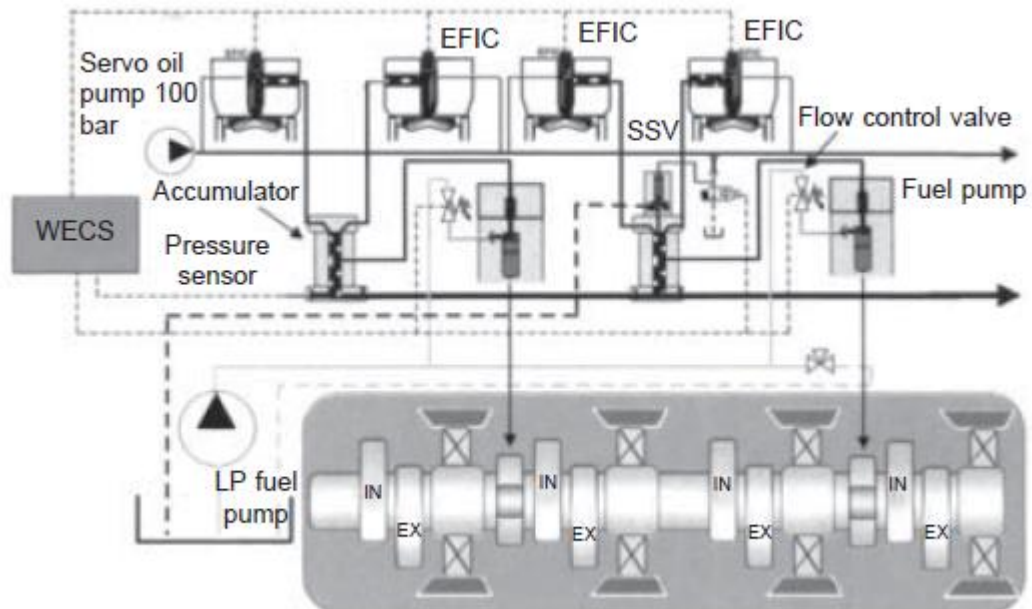
7 NELITAHTI LAIVADIESELIT

Eri valmistajat ovat luoneet omat järjestelmänsä jotka kaikki poikkeavat jonkin verran toisistaan. Tässä luvussa esitellään yleisimmät tänä päivänä käytössä olevat nopeat ja keskinopeat moottorit.

7.1 Wärtsilän Common Rail -nelitahtimoottorit

Wärtsilä kehitti yhdessä Delphi Brycen kanssa keskinopeiden dieselien yhteispaineruiskutusjärjestelmän pitäen silmällä etenkin matkustajalaivoja, joissa pyritään savutuksen minimointiin.

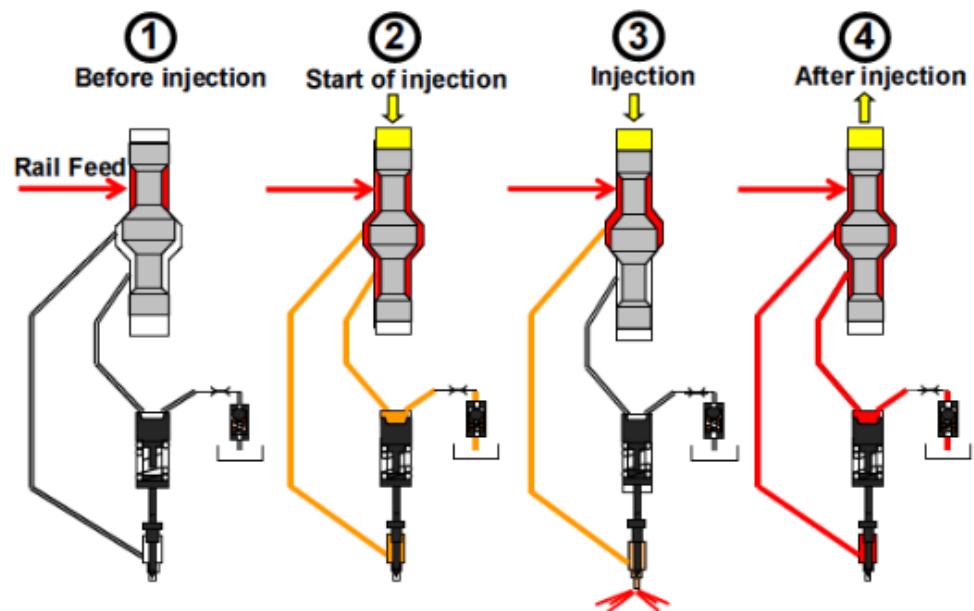
Järjestelmän rakenne on seuraavanlainen: Nokka-akseli käyttää polttoainepumppuja, joita on yksi kahta sylinteriä kohti. Pumputta ruiskutuspainessa oleva polttoaine menee paineakkuihin, joissa on kaksi lähtöä sylintereille. Mikäli sylintereitä on pariton määrä, käytetään yhtä ylimääräistä paineakkua josta polttoaine lähtee vain yhdelle sylinterille. Paineakut ovat kytkettyinä toisiinsa putkien välityksellä. Järjestelmä saatiin näin rakennettua siten, että korkeapaineista polttoainetta sisältävät osat jäävät hotboxiin. (1, 260.)



Kuva 14. Wärtsilän common rail-järjestelmä. (1, 260)

Moottorinohjauksesta vastaa sähköinen Wärtsilä Engine Control System, WECS, joka säätelee ruiskutusta että polttoaineen painetta antureiden antaman tiedon sekä polttoainekarttojen avulla. Polttoaineventtiilien käytöstä huolehtii erillisellä pumpulla toimiva servojärjestelmä, jota tietokone ohjaa solenoidien välityksellä.

Polttoainepumppujen nokat nostavat mäntää kaksi kertaa kierroksen aikana, mutta niiden profiili on perinteiseen verrattuna paljon miedompi, sillä niillä ei ole mitään tekemistä itse ruiskutustapahtuman kanssa. Vähintään yhden paineakun yhteyteen on asennettu käynnistys- ja varoventtiili, joka aukeaa paineen noustessa liian korkealle, sekä ennen käynnistystä kun järjestelmää esilämmitetään kierrättämällä kuumaa raskasöljyä sen läpi.



Kuva 15. Wärtsilän polttoainesuuttimen toiminta. (13, 23)

Polttoaineventtiili koostuu suuttimesta, sukkulaventtiilistä, solenoidiventtiilistä ja suuttimen neulaa käyttävästä männästä. Sukkulaventtiili ohjaa ruiskutusta ja katkaisee polttoaineen kulun suuttimelle ruiskutusten välissä. Sukkulaventtiilin liikkeitä ohjataan servoöljynpaineella, joka kytketään päälle ja pois nopealla solenoidiventtiilillä. Kun ruiskutus alkaa ja sukkulaventtiili on ehtinyt liikkua hieman, se päästää polttoaineen suuttimelle sekä suuttimen neulan männän päälle mikä lukitsee suuttimen kiinni. Kun sukkula on ehtinyt alas, se katkaisee polttoaineen paineen männän päältä ja polttoaine poistuu paineenpitoventtiilin kautta, joka aukeaa kun paine laskee. Suuttimen männän päällä ei ole painetta mutta kärjessä on joten suutin aukeaa ja päästää poltto-

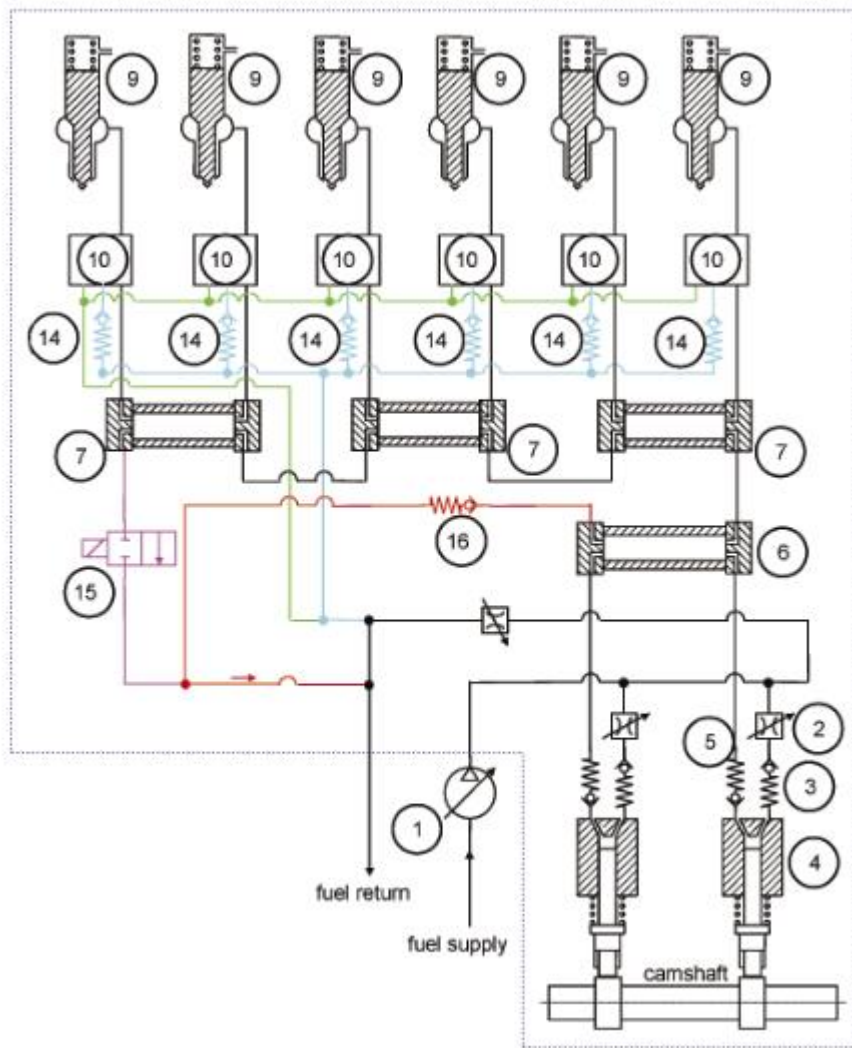
aineen sylinteriin. Tämän järjestelmän avulla saavutetaan hyvin nopeat polttoaineventtiilin aukeamis- ja sulkemisajat sekä korkean, jopa 2000 baarin paineen kesto. Wärtsilän yhteispaineruiskutusjärjestelmä on suunniteltu niin, että se voidaan tarvittaessa jälkiasentaa perinteisen ruiskutuspumppujärjestelmän tilalle (1, 263).

7.2 MAN B&W nelitahtiset dieselmoottorit

MAN B&W:n Common rail suunniteltiin siten, että se tarvittaessa voidaan asentaa jälkikäteen heidän moottoreihinsa. Valmistaja päätyi keskinopeissa dieselieissään ratkaisuun, jossa polttoaineventtiileillä on paine vain ruiskutushetkellä kuten perinteisissäkin ruiskutuspumppujärjestelmissä. Wärtsilän tavoin yhtä koko moottorin pituista polttoainekiskoa ei käytetä, vaan se on jaettu kahden sylinterin kattaviin pätkiin.

Common railin mahdollistamista asioista yksi on MAN B&W:n patentoima boost injection, joka käytännössä tarkoittaa erittäin myöhäistä jälkiruiskutusta, jolla tavoitellaan korkeamman entalpian omaavaa pakokaasua, jolla taas saadaan ahtoilman tuottoa lisäyhty merkittävästi. Tavoitteena on vähentää riittämättömän palamisilman aiheuttamaa savutusta polttoainetalouden kustannuksella.

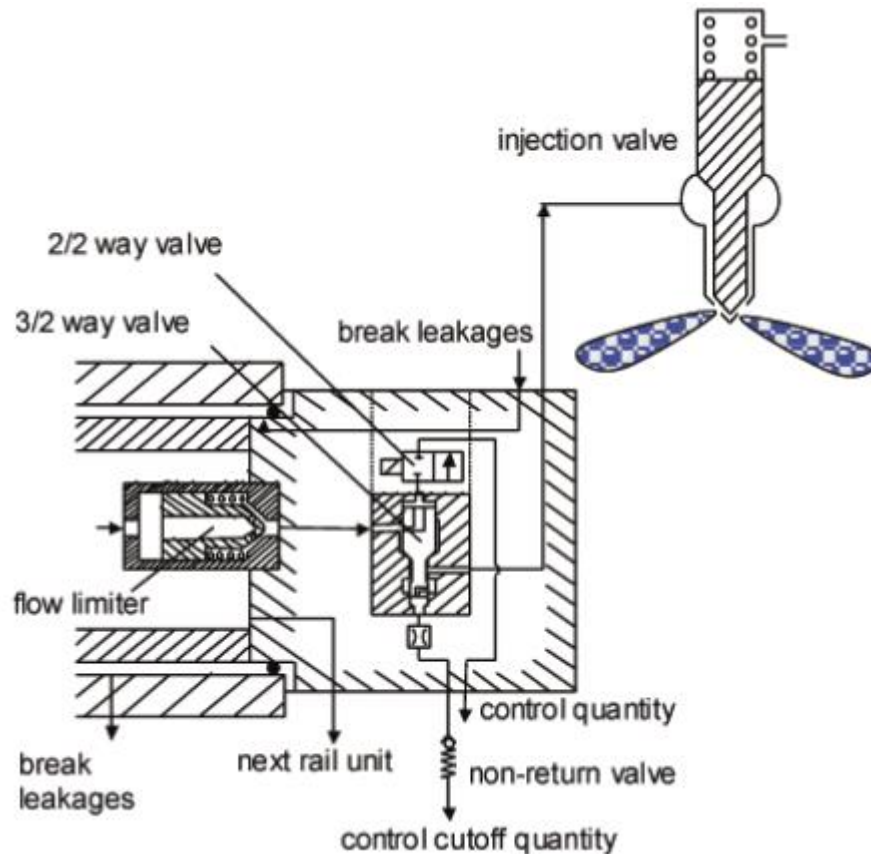
Yksinkertaisuuden vuoksi erillistä servoöljyjärjestelmää ei käytetä, vaan polttoaineventtiilien ohjaus tapahtuu erikoisrakenteisten solenoidiventtiilien avulla. Lähempi tarkastelu kuitenkin paljastaa systeemin olevan kaikesta huolimatta hyvin lähellä servo-ohjattua järjestelmää, servoöljyn sijan vain käytetään polttoainetta. Alla on esiteltyä 32/40 ja 48/60B -moottoreiden polttoaineen ruiskutuksen, että polttoaineventtiilin toimintaperiaate.



Kuva 16. MAN B&W:n common rail-järjestelmä. (6)

Matalapainepumppu [1] syöttää polttoaineen sähköisesti ohjattujen virtauksensäätöventtiilien [2] ja tuloventtiilien [3] kautta korkeapainepumpuille [4]. Sieltä polttoaine kulkeutuu paineenpitoventtiilien [5] kautta paineakkuun [6]. Paineakun yhteydessä on paineenrajoitusventtiili [16], joka aukeaa ja päästää polttoainetta paluulinjaan jos paine nousee liian korkeaksi. MAN B&W:n järjestelmässä polttoainekisko on jaettu pienempiin toisiinsa kytkettyihin yksiköihin [7], joita on yksi kahta sylinteriä kohden. Sähkömagneettisesti ohjattu sulkuventtiili [10] päästää polttoaineen ruiskutusventtiileille [9]. Valmistajan mukaan tämä ratkaisu on nopeampi kuin servo-ohjattu polttoaineen syöttö. Yksiköiden toiminnassaan tuottama vuotoöljy palautetaan takaiskuventtiileillä [14] varustettuja putkia pitkin paluulinjaan. Raskasöljyä käytettäessä järjestelmää lämmitetään kierrättämällä polttoainetta sen läpi huuhteluventtiilin [15] avulla.

Polttoaine tulee paineakusta virtauksenrajoitinventtiiliin (flow limiter) läpi luistiventtiilille (3/2 valve). Virtauksenrajoitinventtiilissä on jousikuormitettu mäntä, jonka iskun pituus kattaa yhden ruiskutuskerran polttoainemäärän. Mäntä sulkee pohjaan mennessään polttoaineen virtauskanavan, mutta palautuu ruiskutuksen jälkeen aina alkuasentoon. Tämän ansiosta voidaan estää esimerkiksi vioittuneen ruiskutusventtiilin aiheuttama jatkuva ruiskutus kun virtauksenrajoitinventtiili sulkeutuu kun polttoainemäärä ylittää ennalta määrätyn yhden ruiskutuskerran arvon. (6.)



Kuva 17. MAN B&W ruiskutussuuttimen toimintaperiaate.(6)

Polttoaine tulee virtauksenrajoitinventtiililtä luistiventtiilille (3/2 valve), joka laskee polttoainetta ruiskutussuuttimelle ohjausventtiilin (2/2 valve) avulla. Luistiventtiilin keskiosaan virtaava polttoaine pyrkii työntämään luistin auki, mutta suurempi hydraulinen paine kohdistuu luistin takapuolelle minne porauksen kautta kulkeutuva polttoaine synnyttää sinne paineen, joka pitää venttiilin suljettuna. Ruiskutus tapahtuu avaamalla sähköisesti ohjausventtiili, joka päästää polttoaineen pois luistin takapuolelta. Tällöin luistia ei mikään pidätä enää ja polttoaine työntää luistin auki -asentoon.

Silloin polttoaineella on vapaa kulku suuttimelle, jonka neulan jousivoiman polttoaineen paine voittaa ja tapahtuu ruiskutus. Kun ohjausventtiili suljetaan, syntyy luistin taakse taas paine joka työntää luistin kiinni ja ruiskutus katkeaa. Ohjausventtiilin toiminnasta aiheutuva ulos vuodettu polttoaine palautetaan takaisin kiertoon.

7.3 MTU (Detroit Diesel).

MTU:n yhdessä Detroit Dieselin kanssa kehittämä 4000-sarjan moottori oli aikanaan ensimmäinen tässä kokoluokassa oleva yhteispaineruiskutusmoottori. L'orangen valmistaman järjestelmän ruiskutuspaineet ovat nousseet alkuperäisestä 1200 baarista nykyiseen 2200 baarin. (1, 795). Moottori pystyy reagoimaan äkillisiin kuormanvaihteluihin erittäin nopeasti, valmistajan mukaan millisekunneissa. Käytetään yhtä ruiskutuspumppua, joka on kytköksissä kampiakseliin hammasrattaiden välityksellä. Ratissa on turvamekanismi, joka kytkee pumpun irti moottorista lisävaurioiden välttämiseksi jos pumppu hajoaa.

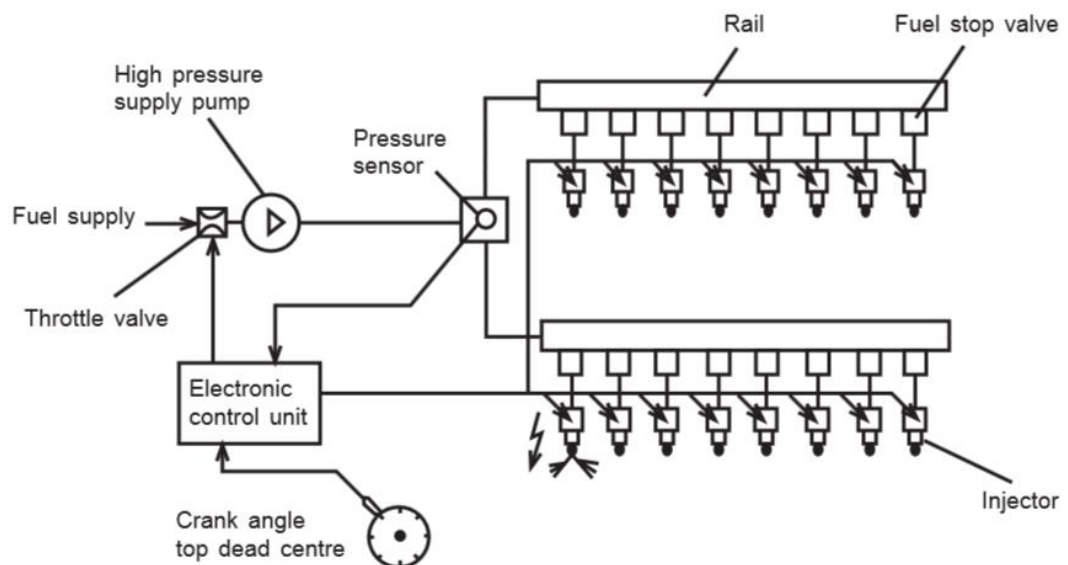
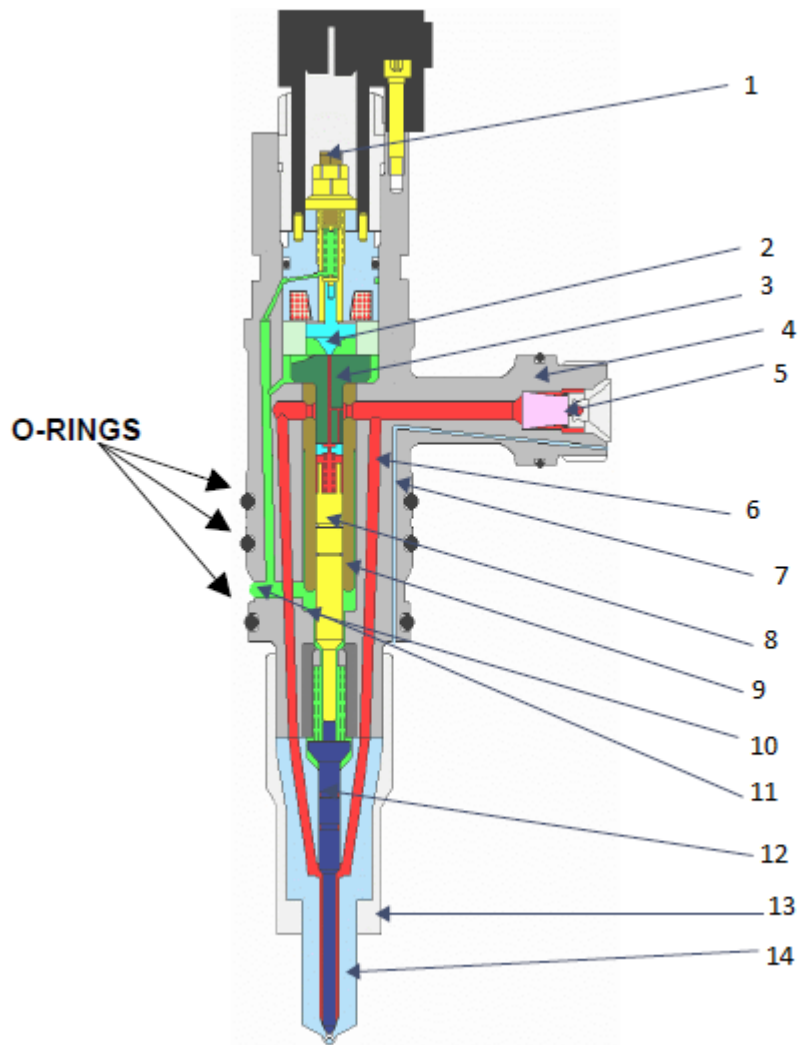


Figure 8.20 Common rail injection system arranged for a V16-cylinder high speed engine (MTU)

Kuva 18. MTU:n common rail-järjestelmä. (1, 255)

Ruiskutussuuttimen vioittuessa polttoaineen tulo katkaistaan erityisellä venttiilillä (Fuel stop valve) joka sulkee kanavan virtauksen noustessa liian korkeaksi. Moottoria voidaan käyttää vielä limp home-moodilla tällaisessa tilanteessa. Toisin kuin monissa laivadieseleissä, MTU:n moottoreiden polttoainekiskoissa ja ruiskutussuuttimilla on jatkuva ruiskutuspaine.



Kuva 19. Ruiskutussuutin. (14)

Suuttimen osat; 1. Solenoidi; 2. Ohjausventtiili; 3. Ohjausyksikkö; 4. Suuttimen runko; 5. Suodatin; 6. Ruiskutusaineinen polttoaine; 7. Vuotokanava; 8. Välimäntä; 9. Holkki; 10. Tanko; 11. Polttoaineen paluu; 12. Suuttimen neula; 13. Suuttimen kärjen lukitusmutteri; 14. Suuttimen kärki

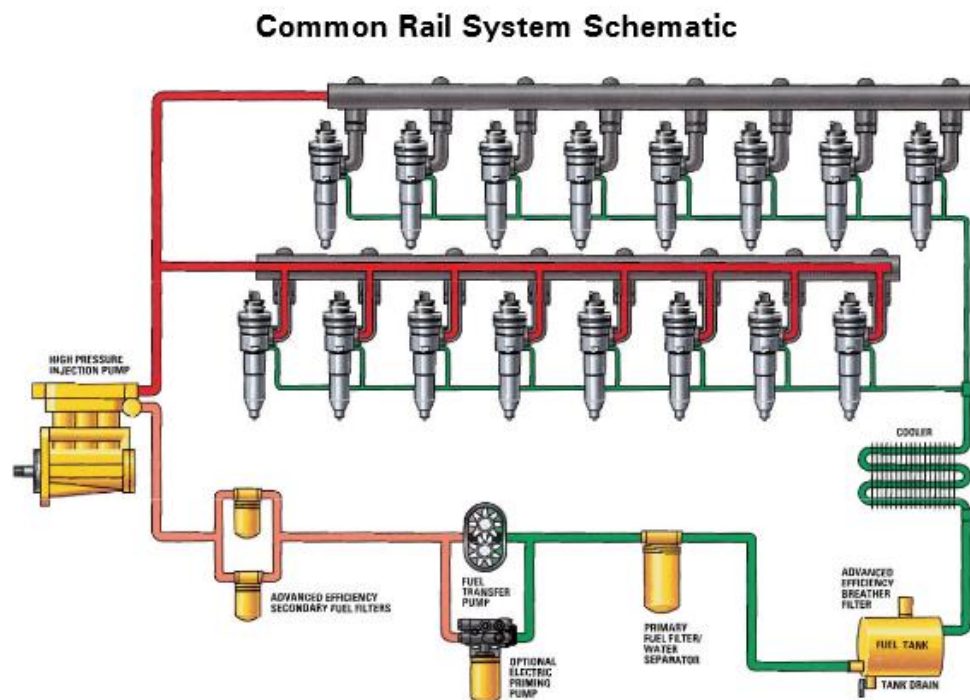
Kytettäessä virta solenoidiin avaa se ohjausventtiilin, joka päästää öljyn pois suuttimen neulaa alhaalla pitävän tangon päältä, jolloin polttoaine työntää suuttimen neulan ylös päästen palotilaan. Ruiskutus katkeaa kun solenoidi sulkee ohjausventtiilin, jolloin välimännän päälle syntyy taas paine, mikä painaa tangon alas sulkien suuttimen kärjen. Noin 10 % suuttimeen menevästä polttoaineesta käytetään suuttimen voiteluun ja jäähdytykseen, tämä osa polttoaineesta palaa paluukanavaa pitkin takaisin kiertoan.

(14.)

Suurissa moottoreissa eräs ongelma on ruiskutuksien aiheuttamat pulssit jotka voivat vaikuttaa viereisten sylintereiden ruiskutussuuttimien toimintaan. Tästä johtuen MTU siirtyi käyttämään erillisiä suuttimien sisäisiä paineakkuja. Kun polttoaineen paine hetkellisesti laskee suuttimen omassa säiliössä, se ei vaikuta muihin suuttimiin. Tästä syystä yllä olevaa suutintyyppiä käytettiin vuoteen 2000 asti ja siitä lähtien käytössä on ollut paineakullinen ruiskutussuutin. (15.)

7.4 Caterpillar

Caterpillarin yhteispaineruiskutus, eli Cat CR on yhteensopiva niin kaasuöljyn kuin raskasöljyn kanssa ja se voidaan asentaa jälkeenpäinkin M 32 C-moottoreihin (MaK). Ruiskutuspumppuja on kaksi, kuten tärkeimpiä antureitakin. Polttoainekiskoja yksi aina kolmelle sylinterille ja voiteluöljyllä jäähdytetyt ruiskutussuuttimet käyttävät ohjausöljynään polttoainetta.



Kuva 20. Caterpillarin common rail- järjestelmä. (17)

Caterpillarin sähköinen moottorinohjaus ECM säätelee moottorin toimintaa mutta varsinainen moottorin tarkkailujärjestelmä on täysin erillinen ja käyttää omia antureita. ECM:n voi jakaa kahteen osaan: Runkojärjestelmä joka käsittää A4E4- ohjausyksikön, yhden kampiakselin ja kaksi nokka- akselin anturia, kaksi korkeapaineanturia,

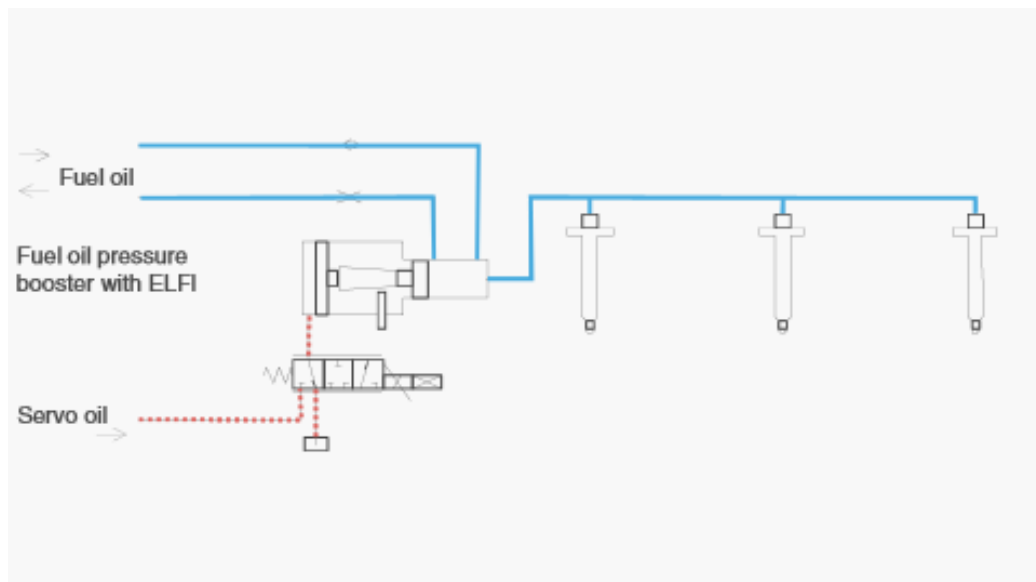
kaksi virtauksensäädintä ja ruiskutussuuttimet. Toinen suorituskyvyllinen puoli koostuu monista erilaisista antureista, kuten pakokaasujen lämpötila, ahtopaine jne. joiden antamien tietojen perusteella säädetään ruiskutusta. (16.)

8 KAKSITAHTIDIESEL

Tässä kappaleessa on esiteltynä toisistaan huomattavasti poikkeavat tunnetuimpien hiidaskäyntisten laivadieseleiden sähköohjatut polttoaineen ruiskutusjärjestelmät.

8.1 MAN B&W

Valmistajan nokka-akselittomat ME-C -sarjan moottorit omaavat eräänlaisen hybridi-ruiskutusjärjestelmän, jossa nokka- akselin sijan ruiskutuspumppuja käytetään hydraulikalla. Hydraulijärjestelmän noin 200 baarin paine luodaan ennen käynnistystä sähkömoottoreilla ja käynnin aikana kampiakselin käyttämien aksiaalimäntäpumppujen avulla. Hydraulikkaöljy kulkeutuu pumpuilta sylinterikohtaisiin HCU, eli hydraulic cylinder uniteihin. HCU koostuu pakoventtiilin ohjaushydrauliikasta, lubrikaattorista ja ruiskutuspumpusta. Näitä ohjataan moottorinohjausyksikön käskyttämällä solenoideilla ja näin ollen sekä sylinteriöljyn määrä, ruiskutus että pakoventtiilin toiminta on vapaasti säädettävissä tilanteen mukaan.

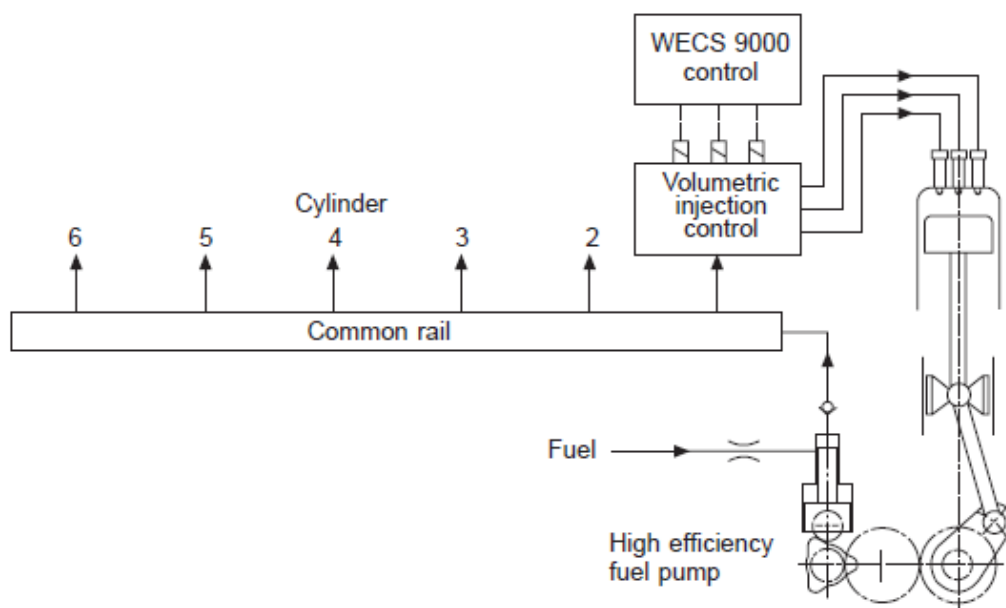


Kuva 21. MAN B&W 2- tahdieselien sähköohjattu ruiskutusjärjestelmä. (11)

Ruiskutuspumppu on hydraulitoiminen mäntäpumppu, joka nostaa polttoainepaineen 10 baarista 600 – 1000 baariin. Pumpun toimintaa ohjaa hydraulikkaöljyn kulkua säätelevä ELFI, electronic fuel injection valve. Kun aiotaan suorittaa ruiskutus, ELFI kääntää hydraulikkaöljyn virtauksen paluulinjasta ruiskutuspumpun männän hydraulikkapuolelle. Polttoaineen sisäänmenoventtiili suljetaan kun haluttu määrä polttoainetta on ruiskutusmännän päällä, tällöin paine nousee männän noustessa ja kumoaa ruiskutusventtiilien jousivoiman. (11.)

8.2 Sulzer

Sulzerin RT-flex -sarjan moottorit ovat käytännössä katsoen RTA-moottoreita, joissa ruiskutuspumput ja nokka-akseli on korvattu yhteispaineruiskutuksella ja hydraulikalla. Ruiskutussuuttimien toimintaa ohjataan ohjausöljyllä ja pakoventtiilejä servoöljyllä. Common rail Järjestelmä koostuu polttoainekiskosta, korkeapainepumpusta, ohjaus- ja servoöljyn suodatinyksiköstä ja sähköisestä moottorinohjauksesta sisältäen myös anturit.



Kuva 22. Sulzer RT-flex moottorin ruiskutusjärjestelmä. (1, 422)

Polttoaineen ruiskutuspaineen sekä servoöljyn paineen tuotosta vastaa järeä moottorilohkon sivulle sijoitettu korkeapainepumppu, jota kampiakseli pyörittää hammasrat- taiden avulla. Pumpun toisessa päässä sijaitsevat v-muotoon pystyyn sijoitetut poltto- ainepumput, ja toisessa päässä vinolevy-tyyppiset servoöljypumput. Polttoainepumput

ovat mäntäpumppuja, joita käyttää kolmella nokalla varustettu akseli, joka pyörittää useamman kerran yhden kampiakselin kierroksen aikana. Näin paineentuotto saadaan riittämään pumppuyksikön koon pysyessä kurissa. Polttoaineen virtauksen ja paineen määrän säättää imupuolelle sijoitettu kuristusventtiili. Ohjaus- ja servoöljynä käytetään moottorin voiteluöljyä, jota lasketaan 6 mikronin automaattisuodattimen läpi ja jaetaan kahtia, toinen haara erillisille sähkömoottorikäyttöisille ohjausöljypumpuille ja toinen servoöljypumpuille. Näiden kummankin öljynpaineena käytetään noin 200 baa-ria. Ohjausöljyä käytetään myös servopuolella ennen koneen käynnistystä.

Polttoainekisko, joka on kahdeksansylinterisiin asti yhtenäinen ja useampisylinterissä kaksiosainen, sijaitsee konetopin alapuolella. 1-koon moottoreissa kisko on osastoitu sylintereittäin, kun taas 4-koossa valmistuksen helpottamiseksi ja kokoonpanoaikojen lyhentämiseksi se on yksi pitkä kisko, jonka päissä pelkästään on laipat.

ICU, eli ruiskutuksen ohjausyksikkö, koostuu ruiskutuksen ohjausventtiileistä ja sähköhydraulisista kiskoventtiileistä. Kiskoventtiilit ohjaavat tietokoneen signaalin perusteella öljynpaineen avulla ohjausventtiileitä, jotka päästävät polttoaineen ruiskutus-suuttimille. Jokaista ruiskutussuutinta kohden on yksi ohjaus- ja kiskoventtiili, jotta niitä kaikkia voi tarpeen tullen käyttää itsenäisesti. Ruiskutussuuttimet ovat tavallisia RTA-mallin suuttimia. Moottorinohjaus on jo aikaisemmin mainittu WECS, joka koostuu joka sylinterille erikseen pyhitetystä sähköisestä ohjausyksiköstä, keskusyksiköstä sekä kahdesta kampiakselin asentotunnistimesta. (9.)

9 PÄÄTELMÄT

Hienostuneemmat dieselruiskutusjärjestelmät tullevat kasvattamaan suosiota tulevana vuosina. Nousevat polttoaineiden hinnat ja tiukkenevat päästölainsäädännöt vauhdittavat kehitystä entisestään. Etenkin yhteispaineruiskutusmoottoreiden osuus laivadielseleiden keskuudessa tulee kasvamaan vielä paljonkin. Moni suurimmista valmistajista, kuten Wärtsilä, on tuonut oman common railinsa markkinoille vasta joitain vuosia sitten. Vaikka vastoinikäymisiä on uuden tekniikan kanssa ollut, virheistä on opittu ja jatkokehitystä tapahtunut. Siitä esimerkkinä MAN B&W:n kaksitahtimoottoreissa ruiskutuselektroniikkaa jouduttiin muuttamaan, kun aiemman version jännitteensäädin tuotti liikaa lämpöä (21). Saman valmistajan nelitahtisissa yhteispaineruiskutusmoot-

toreissa ohjausventtiili kärsi kavitaatiosta jo hyvin pienillä käyttötunneilla, mutta männän rakenteen muutoksen myötä ongelma hävisi (6).

Wärtsilän nelitahtimoottoreissa jouduttiin vaihtamaan moottorin johtosarja takaisin vanhaan malliin, jossa on vähän liittimiä, sillä se osoittautui paljon luotettavammaksi. Käyttäjäkokemukset ovat olleet positiivisia ja monet alkupään koneet ovat käyneet jo kymmeniä tuhansia tunteja ongelmitta. (23.)

Ruiskutuspainet kasvavat jatkuvasti kaikissa ruiskutustyypeissä, mutta yli 2000 baarin mentäessä paineen tuottaminen yhdessä vaiheessa käy hankalaksi. Mikäli tavoittelaa sitäkin suurempia paineita, voi tulla kysymykseen kahdessa vaiheessa tuotettava ruiskutusaine, kuten HEUI-järjestelmässä. HEUI-tekniikan lisäetuna yhteispaineruiskutukseen verrattuna on myös, että jokainen ruiskutus on mahdollista suorittaa eri paineella, kiitos hydraulisesti ohjatun pumppusuuttimen. (2, 13.)

EUI ja EUP ovat edelleen korkeimpaan ruiskutuspaineseen kykeneviä järjestelmiä. Pienissä moottoreissa jo 2000 – 2500 baaria on tätä päivää ja laboratorio-oloissa on saavutettu jo 3000 baarin ruiskutuspainetakin. Niiden heikkoutena kuitenkin on kovan paineen vaatima äärimmäisen jäykkä polttoainepumpun koneisto ja muihin verrattuna rajoittunut ruiskutuksen säädeltävyys. Todennäköisesti niiden suosio vähenee sitä mukaa, kun muiden järjestelmien ruiskutuspainet kasvavat. (2, 104–105.)

Pietsosähköisiä ruiskutusventtiileitä on tutkittu myös isompien moottoreiden yhteydessä ja Wärtsilä on jo patentoinut omansa (22), joten ehkäpä tulevaisuudessa pietsosähköiset suuttimet tulevat laivadieseleihin.

Jatkossa yhä useampi konemestari joutuu tekemisiin sähköisesti ohjattujen polttoaineruiskutusjärjestelmien kanssa ja vianhaku tulee muuttumaan merkittävästi tietokoneiden myötä. Onkin hyvin todennäköistä, että tulevina vuosikymmeninä yhteispaineruiskutus tulee syrjäyttämään perinteisen laivadieseleiden ruiskutusjärjestelmän lähestulkoon kokonaan.

LÄHTEET

1. Pounder's Marine Diesel Engines and Gas Turbines. 8. painos. Englanti. 2004 Elsevier Ltd. ISBN 0-7506-5846-0
2. Dingle, P Ming- Chia, D. Diesel Common Rail and advanced fuel injection systems. SAE International. 2005. USA. ISBN 0-7680-1257-0
3. Mollenhauer, K Tschoeke H. Handbook of Diesel Engines. 2010 Springer- Verlag Berlin. Saksa. ISBN 978-3-540-89082-9
4. Robert Bosch GmbH. Bentley Publishers. USA. 4. Painos. 2005. ISBN 0-8376-1353-1
5. Jääskeläinen, H Khair, M K. Common rail fuel injection, 2013. Saatavissa: http://www.dieselnet.com/tech/diesel_fi_common-rail.php. [Viitattu 18.1.2014]
6. Man Diesel & Turbo. New HFO Common Rail system for medium- speed diesel engines. 2004. Internet sivut. http://www.mandieselturbo.com/files/news/files/4321/CommonRail_CIMAC.pdf [Viitattu 7.2.2014]
7. Jussila S. 2013. Future combustion energy power plant. Saatavissa: http://www.cleen.fi/en/Public%20deliverables/6_FCEP_Increased%20energy%20efficiency%20by%20new%20engine%20components%20and%20heat%20recovery_Jussila.pdf [Viitattu 22.3.2014]
8. Operational Information The Computer Controlled Electronic Engine. Saatavissa: http://www.marinediesels.info/2_stroke_engine_parts/Other_info/electronic_engine.htm [Viitattu 2.1.2014]
9. Wärtsilä Switzerland Ltd. The Sulzer RT- flex common rail system described. 2004. Artikkel, saatavissa: <ftp://vk.od.ua/20011.pdf>. [Viitattu 9.2.2014]

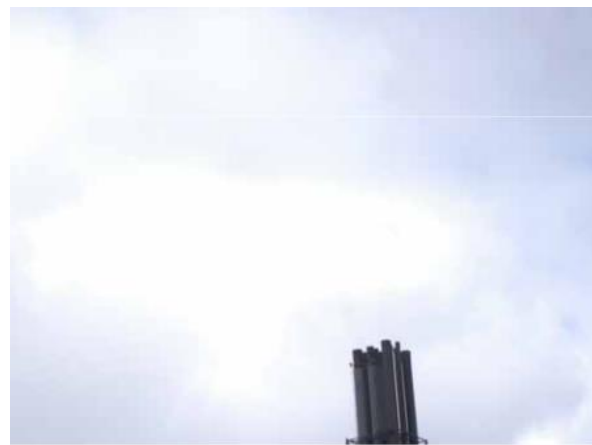
10. Wärtsilä. Mechanical flex features. 2006. Saatavissa: <http://engg.marine-files.net/upload/Basic%20Mechanical%20features%20of%20RT-%20flex%20engine.pdf> [Viitattu 23.3.2014]
11. MAN diesel. ME Engines – the New Generation of Diesel Engines. Saatavissa: <http://www.mandiesel.com/files/news/files/2810/p412-0503.pdf> [Viitattu 20.3.2014]
12. Caterpillar. Hydraulically Actuated Electronic Unit Injector (HEUI) Systems. Saatavissa: <http://dieselclass.com/Fuels%20Files/HEUI%201-08.pdf> [Viitattu 9.3.2014]
13. Mäkinen A, Lehto T. 2013. Wärtsilä 46 F Commonrailpolttoainejärjestelmä. Opinnäytetyö. Satakunnan ammattikorkeakoulu.
14. Detroit Diesel. Series 4000 Common Rail System. Saatavissa: <http://www.dieseldiagnosticsources.com/newpsl/Content/44/44.pdf> [Viitattu 9.2.2014]
15. MTU. Common rail fuel injection: Key technology for clean and economical combustion. 2011. Saatavissa: http://www.mtu-online.com/fileadmin/fm-dam/mtu-global/technical-info/white-papers/3100651_MTU_General_WhitePaper_CommonRail_2011.pdf [Viitattu 24.3.2014]
16. MaK Unatrack. Cat Common Rail. 2010. Internet sivut. Saatavissa: http://www.makunatrack.com/index.php?pg=login&type=login&id=product_pdf/8.pdf&title=CAT%20Common%20Rail [Viitattu 8.2.2014]
17. Caterpillar. Diesel fuels and diesel fuel systems application and installation guide. Saatavissa: <http://www.weindex.info/pdf/FuelSystem/5.pdf> [Viitattu 28.2.2014]
18. Wärtsilä. Benefits by Common Rail injection. 2005. Saatavissa: <http://www.pomorci.com/Edukacija/120/Benefits%20by%20Common%20Rail.pdf> [Viitattu 8.2.2014]

19. Diesel United. DU- Wärtsilä RT- Flex engine. 2006. Saatavissa:
http://www.ihl.co.jp/du/english/afterservice/technologies/pdf/du_sulzer_rt_flex_english.pdf [Viitattu 8.2.2014]
20. Jääskeläinen, H Khair, M K. Diesel fuel injection, 2013. Saatavissa:
https://www.dieselnets.com/tech/diesel_fi.php [Viitattu 23.3.2014]
21. Service experience 2008, MAN B&W engines ME/ME-C and MC/MC-C engine series. 2008. Saatavissa: ftp://vk.od.ua/Service_Experience_2008.pdf [Viitattu 15.3.2014]
22. FPO. 2013. Fuel injector valve. Patentti.
<http://www.freepatentsonline.com/8579253.pdf> [Viitattu 24.3.2014]
23. Wärtsilä. Common rail engine- how are you today? Saatavissa:
<http://www.wartsila.com/file/Wartsila/en/1278511904538a1267106724867-Wartsila-SP-A-Id-4s-Engines-b.pdf> [Viitattu 24.3.2014]

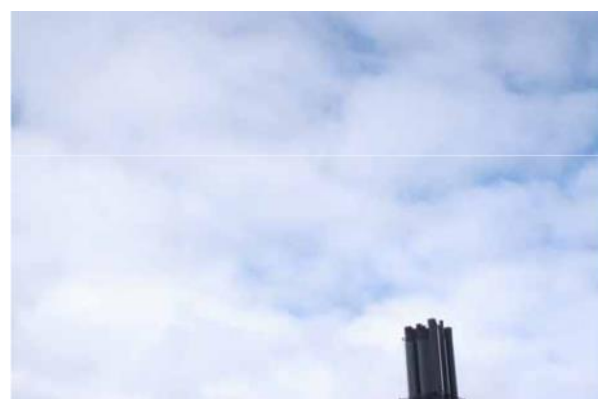
LIITE



Käynnistys



30 % kuormalla



Maksimisavutus manöveeratessa



Common rail

Perinteinen